



HAL
open science

Hydrocarbures et métaux en milieu urbain

R. Moilleron

► **To cite this version:**

R. Moilleron. Hydrocarbures et métaux en milieu urbain. Sciences de l'environnement. Université Paris-Est Créteil, 2004. tel-01700635

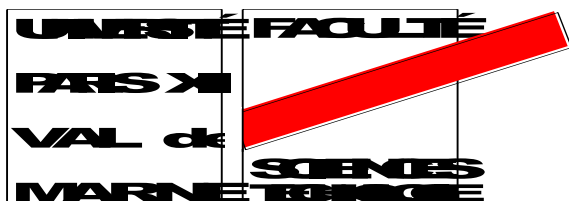
HAL Id: tel-01700635

<https://hal.science/tel-01700635>

Submitted on 6 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE PARIS XII-VAL DE MARNE

**Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme d'Habilitation à Diriger des
Recherches**

PAR REGIS MOILLERON

HYDROCARBURES ET METAUX EN MILIEU URBAIN

SOUTENU LE 13 DECEMBRE 2004

COMPOSITION DU JURY

M. BERNARD CHOCAT
M. PHILIPPE GARRIGUES
M. MICHEL MEYBECK
M. JEAN-MARIE MOUCHEL
M. DANIEL THEVENOT

RAPPORTEUR
RAPPORTEUR
RAPPORTEUR
EXAMINATEUR
DIRECTEUR DE RECHERCHES

INSA LYON
UNIVERSITE BORDEAUX I
UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE-PARIS VI
ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES
UNIVERSITE PARIS XII-VAL DE MARNE

LISTE DES ABREVIATIONS.....	3
AVANT PROPOS.....	5
ACTIVITES DE RECHERCHE.....	9
INTRODUCTION.....	10
ETUDE DES SEDIMENTS ET DES SOLS EN MILIEU RURAL.....	12
I. <i>Mesure des acides α-aminés dans les sédiments lacustres jurassiens.....</i>	<i>12</i>
II. <i>Rétention d'herbicides par des sols : influence de la matière organique et de la température.....</i>	<i>13</i>
GESTION DES MATERIAUX DE DRAGAGE.....	16
I. <i>La problématique.....</i>	<i>16</i>
II. <i>Le dragage dans le bassin de la Seine.....</i>	<i>20</i>
III. <i>Impact environnemental de la mise en dépôt de matériaux de dragage.....</i>	<i>25</i>
IV. <i>Bilans sur 6 années de recherche.....</i>	<i>31</i>
LES MICROPOLLUANTS EN MILIEU URBAIN ANTHROPISE.....	33
I. <i>Problématique.....</i>	<i>33</i>
II. <i>Etude à l'échelle du réseau d'assainissement.....</i>	<i>36</i>
III. <i>Etude à l'échelle d'un bassin versant : Le Marais.....</i>	<i>38</i>
IV. <i>Etude à l'échelle de l'agglomération parisienne.....</i>	<i>40</i>
V. <i>Bilan sur 6 années de recherche.....</i>	<i>42</i>
LES FUTURS PROJETS DE RECHERCHE.....	44
I. <i>Dans la continuité des programmes actuels.....</i>	<i>44</i>
II. <i>Les graisses en réseau d'assainissement.....</i>	<i>50</i>
RESPONSABILITES DE CONTRATS DE RECHERCHE.....	53
BIBLIOGRAPHIE.....	55
NOTICE.....	58
CURRICULUM VITÆ.....	59
CURSUS UNIVERSITAIRE.....	59
PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES.....	61
I. <i>Publications.....</i>	<i>61</i>
II. <i>Rapports d'activités.....</i>	<i>62</i>
III. <i>Communications.....</i>	<i>63</i>
IV. <i>Synthèse.....</i>	<i>65</i>
ENCADREMENT DE TRAVAUX SCIENTIFIQUES D'ETUDIANTS.....	67
I. <i>Doctorat en Sciences et Techniques de l'Environnement.....</i>	<i>67</i>
II. <i>DEA Sciences et Techniques de l'Environnement.....</i>	<i>67</i>
III. <i>Maîtrise de Chimie (C), de Biologie (B), d'Environnement (E) et MST Génie Sanitaire et Environnement (GSE).....</i>	<i>67</i>
IV. <i>Licence de Chimie et Electrochimie Appliquées.....</i>	<i>68</i>
V. <i>Supervisions de stages scientifiques d'étudiants.....</i>	<i>68</i>
VI. <i>Synthèse.....</i>	<i>68</i>
ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT.....	70
I. <i>1997-2000 : adaptation des enseignements disponibles.....</i>	<i>71</i>
II. <i>2000-2004 : créations de nouveaux enseignements.....</i>	<i>72</i>
III. <i>Et le LMD dans tout cela ?.....</i>	<i>74</i>
ACTIVITES ADMINISTRATIVES.....	77
I. <i>Co-direction du DESS « Stratégie d'Analyse et Maîtrise de la Qualité en Chimie et Biochimie (SAMQCB) ».....</i>	<i>77</i>
II. <i>Responsable Hygiène et Sécurité de la Faculté des Sciences et de Technologie.....</i>	<i>77</i>
III. <i>Correspondant « (Nouvelles) Technologies de l'Information et des Communications » de la Faculté des Sciences et de Technologie.....</i>	<i>78</i>
IV. <i>Tutorat de moniteurs.....</i>	<i>79</i>
V. <i>Conseil de Gestion de la Faculté des Sciences de Paris XII-Val de Marne.....</i>	<i>79</i>
VI. <i>Comité « Hygiène et Sécurité » de l'Université de Paris XII-Val de Marne.....</i>	<i>79</i>
VII. <i>Commissions de Spécialistes.....</i>	<i>79</i>

LISTE DES ABREVIATIONS

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AESN	Agence de l'Eau Seine Normandie
BVUE	Bassin Versant Urbain Expérimental
CEMAGREF	Centre d'Études du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
CEREVE	Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Eau la Ville et l'Environnement
CEVU	Conseil des Etudes et de la Vie Universitaire
CG-SM	Chromatographie Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse
CHS	Comité Hygiène et Sécurité
CIES	Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur
CLHP	Chromatographie Liquide Haute Performance
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CNU	Conseil National des Universités
COFRAC	Comité Français d'ACréditation
CRIF	Conseil Régional d'Ile de France
CST BVRE	Conseil Scientifique et Technique des Bassins Versants de Recherche Expérimentaux
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DBO5	Demande Biologique en Oxygène à 5 jours
DEA	Diplôme d'Études Approfondies
DESS	Diplôme d'Études Supérieures Spécialisées
DGT	Diffusive Gradient in Thin films
DIREN	Direction Régionale de l'Environnement
DRIRE	Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement
EMCC	Entreprise Morillon Corvol Courbot
ENGREF	École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
ENPC	École Nationale des Ponts et Chaussées
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HC	Hydrocarbures
IBD	Indice Biologique Diatomées
ICP-AES	Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER
INA	Institut National d'Agronomie
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité
INRA	Institut National de Recherche Agronomique
INSA	Institut National des Sciences Appliquées
LCPC	Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées
LHE EPHE	Laboratoire d'Hydrologie et d'Environnement de l'École Pratique des Hautes Études

LMD	Licence - Master - Doctorat
MST GSE	Maîtrise de Sciences et Techniques « Génie Sanitaire et Environnement »
(N)TIC	(Nouvelles) Technologies de l'Information et des Communications
OPA	Dialdéhyde orthophtalique
OPUR	Observatoire des Polluants Urbains
PAP	Port Autonome de Paris
PIREN	Programme Interdisciplinaire de Recherche en ENvironnement
QHAN	Qualité et fonctionnement Hydrologique des systèmes aquatiques du groupement d'ANTony
RNB	Réseau National de Bassin
RUTP	Rejets Urbains par Temps de Pluie
SAMQCB	Stratégie d'Analyse et Maîtrise de la Qualité en Chimie et Biochimie
SIAAP	Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne
SNS	Service de Navigation de la Seine
SPE	Solid Phase Extraction
SPMD	Semi-Permeable Membrane Device
STPI	Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur
UPVM	Université Paris XII-Val de Marne
UV	Ultra Violet
VICPOL	Vitesse de CHute des POLluants
VNF	Voies Navigables de France

AVANT PROPOS

L'histoire des pollutions est un miroir des progrès de la technologie (Lévêque, 1996). Si cette réflexion est particulièrement juste pour la pollution atmosphérique (Figure 1), elle peut également s'appliquer à la pollution des eaux continentales au regard de l'évolution des sources de pollution depuis la fin du XIXe siècle (Figure 2). C'est à partir de la révolution industrielle, à la fin du XVIIIe siècle, que l'on commence à ressentir d'une manière significative l'action de l'homme sur son environnement en particulier sur l'atmosphère et sur les eaux de surface. La notion de risque pour le milieu naturel (faune et flore) est alors absente des esprits et les activités industrielles rejettent abondamment des quantités importantes de substances nocives dans l'environnement sans souci de leur impact sur l'écosystème. Dans les pays industrialisés, la pollution des cours d'eau s'est considérablement aggravée durant la seconde moitié du XXe siècle (Lévêque, 1996), les principales sources de pollution proviennent alors des activités agricoles, des activités urbaines et des activités industrielles.

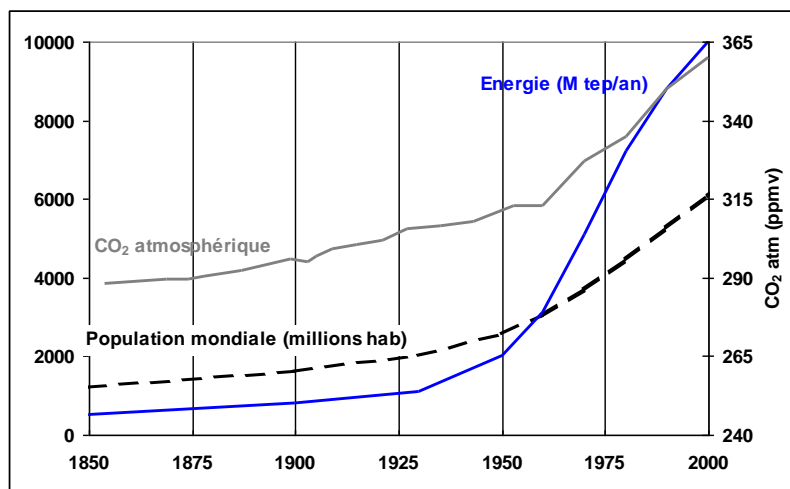


Figure 1. Evolution comparée de la consommation d'énergie (M tep/an), des concentrations du CO₂ atmosphérique (ppmv) et de la population mondiale (millions d'habitants) depuis 1850

La pollution se manifeste principalement, dans les eaux de surface, par une diminution de la teneur en oxygène dissous, la présence de produits toxiques (chimiques et biologiques), une prolifération d'algues, une modification physique du milieu récepteur (qui s'accompagne d'une augmentation de la turbidité de l'eau, d'une modification de la salinité ou d'une augmentation de la température). Les activités industrielles et urbaines génèrent une pollution dite « ponctuelle » c'est-à-dire dont la source est bien localisée. L'agriculture entraîne par contre une pollution dite « diffuse » :

- la pollution ponctuelle, souvent relativement immédiate, provient de sources bien identifiées et peut être traitée par les stations d'épuration,
- la pollution diffuse, comme celles dues aux épandages de pesticides et d'engrais sur les terres agricoles, concerne l'ensemble d'un bassin versant et met plus de temps à atteindre les milieux aquatiques et seules des actions à la source peuvent la réduire en limitant l'usage des substances responsables.

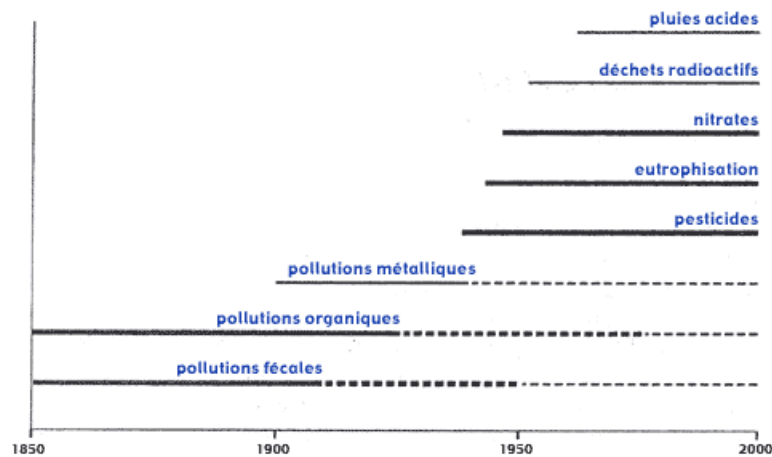


Figure 2. Chronologie des principales sources de pollution des eaux continentales dans les pays industrialisés, d'après C. Lévêque (1996)

La prise de conscience de l'impact de la pollution sur les ressources en eau est contemporaine et remonte à une ou deux générations. Toutefois, si la création d'un ministère de l'environnement est assez récente, les préoccupations envers l'environnement industriel et sa protection sont bien plus anciennes en France. On peut citer le décret impérial du 15 octobre 1810 (suite à l'essor des manufactures) comme première réglementation contrôlant les installations sources de nuisances et de risques. Ce décret soumettait à autorisation préalable le fonctionnement des ateliers susceptibles d'occasionner des gênes pour le voisinage (3 classes possibles d'autorisation). Ce décret a été appliqué jusqu'à la loi du 19 décembre 1917 (qui a remplacé la 3^{ème} classe par la notion de déclaration) pour finalement donner naissance à la loi n°76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)¹. Cependant, la sensibilisation du grand public à la dégradation de l'environnement a commencé avec les catastrophes écologiques provoquées par certaines activités industrielles : déversement de mercure dans la baie de Minamata dans les années 1950, accident pétrolier du Torrey Canyon en 1967, Seveso en 1976, Tchernobyl en 1986... La « Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement », lors de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (en 1992) et l'Agenda 21 ont contribué au développement d'une politique de protection de l'environnement internationale en reconnaissant, entre autre, le principe de précaution et celui du pollueur-payeur comme principes directeurs. En France, plusieurs lois visent à préserver l'environnement : qualité de l'air (loi n°96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie), qualité de l'eau (loi n°92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau). La loi n°95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement complète la loi n°92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau, notamment en matière de prévention des risques d'inondation. La nouvelle directive cadre européenne sur l'eau (Directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000) ne remet pas en cause les fondements de cette politique de l'eau en France, bien au contraire, puisqu'elle confirme :

- la gestion par bassin et sa généralisation au niveau européen ;
- la place du milieu naturel comme élément central de la politique de l'eau (dans la droite ligne de la loi n°92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau qui affirme le principe de gestion équilibrée de la ressource) ;
- le principe pollueur - payeur ;
- le rôle des acteurs de l'eau.

¹ <http://www.irma-grenoble.com/07reglement/industries.htm> (sur les Textes relatifs aux installations industrielles à risques)

Ainsi mes travaux de recherche au Cereve s'inscrivent-ils dans une approche qui vise à évaluer les flux (entrées et sorties) de différents micropolluants, organiques (hydrocarbures aliphatiques et aromatiques) et minéraux (éléments métalliques), à l'échelle d'un bassin versant en milieu anthropisé comme le schématise la Figure 3. A partir de la connaissance de ces flux, l'objectif est de mieux comprendre les échanges qui existent entre les différents compartiments du bassin versant : atmosphère, eau, sol. Trois niveaux ont été considérés :

- Le bassin versant de la Seine (compartiment C) a été, tout d'abord, étudié en considérant comme bassin versant un territoire qui regroupe tous les terrains sur lesquels ruissent, s'infiltrent et courent toutes les eaux qui alimentent une rivière. En considérant qu'il intègre également les activités naturelles et anthropiques qui s'y déroulent, alors les sols, la végétation, les animaux et les êtres humains sont partie intégrante du bassin versant. Ce dernier remplit, dès lors, des fonctions à la fois hydrologiques, écologiques, sociologiques, économiques et touristiques. Cette approche a été conduite dans le cadre de mes activités liées à la gestion des matériaux de dragage dans le bassin de la Seine, même si la zone étudiée ne comprend que la partie amont du bassin versant de la Seine *stricto sensu*, de sa source à Poses (27).
- La ville (compartiment A) a été ensuite examinée avec le double objectif de déterminer la contribution des différentes activités humaines à la pollution mesurée en réseau d'assainissement unitaire (compartiment B) et d'évaluer l'impact de l'agglomération parisienne sur l'écosystème Seine en utilisant des indicateurs, tels que les flux de retombées atmosphériques et les teneurs en HAP à l'amont et à l'aval de Paris ;
- Le réseau d'assainissement unitaire (compartiment B) nous a enfin permis de mieux comprendre la dynamique de ses dépôts et leur contribution à la pollution mesurée à l'exutoire d'un bassin versant urbain lors d'épisodes pluvieux ; ici le bassin versant désigne un territoire sur lequel toutes les eaux s'écoulent vers la station d'épuration, bien que des rejets directs dans le milieu récepteur soient observés lors des épisodes orageux.

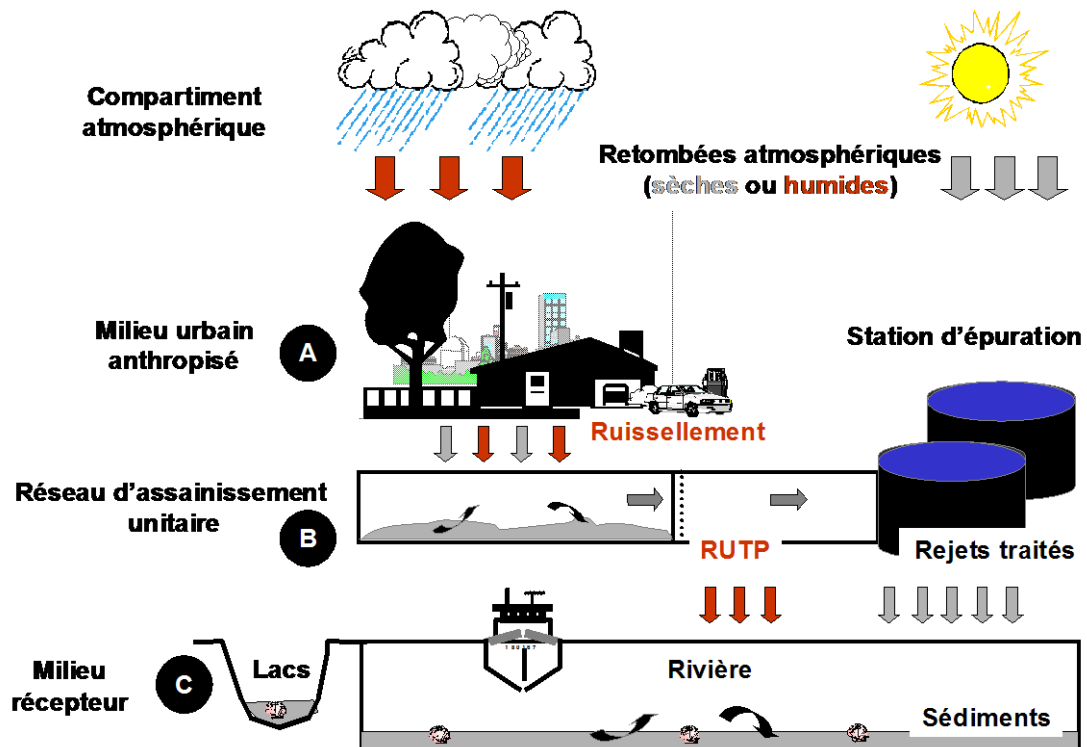


Figure 3. Les polluants en milieu anthropisé, adapté de Garnaud (1998)

Ce document est une synthèse de mes activités scientifiques depuis mon recrutement en tant que Maître de Conférences de l'Université Paris XII-Val de Marne en septembre 1997. J'ai alors intégré le pôle « Qualité des Eaux » du Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Eau, la Ville et l'Environnement (Cereve), laboratoire commun à l'Université Paris XII-Val de Marne (UPVM), l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) et l'École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (ENGREF). Ce mémoire, destiné à l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches, s'articule donc autour de deux parties distinctes : la première traite de mes activités de recherche alors que la seconde est une notice individuelle détaillée. La partie sur mes activités de recherche présente les travaux, que j'ai réalisés, d'une part, dans le cadre de mon doctorat, préparé à l'Université de Franche-Comté, sur les sédiments et les sols en milieu rural, et ceux développés à l'Université de Paris XII-Val de Marne, en milieu urbain, d'autre part. Pour ces derniers programmes, les contextes environnementaux dans lesquels ils s'inscrivent sont mis en avant et les démarches scientifiques sont exposées. Afin de compléter cette première partie, différentes perspectives de recherches sont ensuite présentées, soit dans le prolongement des programmes existants, soit sur de nouvelles thématiques qui pourraient être développées. Une notice individuelle, détaillant mon cursus universitaire, mes publications et communications scientifiques, mes encadrements de travaux scientifiques d'étudiants, mes activités d'enseignement et enfin mes activités administratives, complète ce document.

ACTIVITES DE RECHERCHE

INTRODUCTION

Depuis que j'ai intégré le pôle « Qualité des Eaux » du Cereve en septembre 1997, j'ai eu la charge du développement d'études environnementales en milieu urbain. Je me suis investi dans deux projets de recherche, avec une réorientation de mes activités. En effet, ces deux projets sont relativement différents du domaine qui fut le mien durant mon doctorat consacré à l'étude de la rétention d'herbicides par des sols agricoles et l'influence de la matière organique et de la température sur ces phénomènes. Je suis passé d'une approche théorique, avec principalement du travail de paillasse, à une approche « terrain », qui m'était jusqu'alors inconnue. Ainsi, le premier thème concerne le devenir des matériaux de dragage après leur mise en dépôt, et par extension, l'amélioration des connaissances sur la pratique du dragage dans le bassin de la Seine. Le second thème est relatif à l'identification des sources d'hydrocarbures en milieu urbain et plus spécifiquement en réseau d'assainissement unitaire.

Le Laboratoire de Chimie des Eaux de l'Université de Franche-Comté, à Besançon (25), est agréé par le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable et le Ministère de l'Industrie pour l'étude et l'analyse des micropolluants organiques. Il est également laboratoire certifié COFRAC. En association avec les biologistes, les pédologues et les géologues de l'Institut des Sciences et Techniques de l'Environnement, il recherche la nature et la quantité de micropolluants et leurs transferts vers l'atmosphère, les eaux, les sédiments, les boues et les sols. Un effort particulier a été porté par le Laboratoire de Chimie des Eaux sur les diverses formes de la matière organique présentes dans ces milieux. Dans le cadre de mon DEA, j'ai développé une technique d'analyse des acides α -aminés dans les sédiments lacustres jurassiens dans le but d'établir une classification de ces lacs basée sur leur fonctionnement. Puis durant mon doctorat, mon intérêt s'est porté sur les interactions entre les herbicides et les différents constituants des sols agricoles afin de mieux comprendre les mécanismes régissant la mobilité des herbicides. La partie « Etude des sédiments et des sols en milieu rural » présente les principaux résultats obtenus sur ces deux thèmes.

Le projet sur le devenir des matières de dragage, que j'ai initié au sein du Cereve, s'inscrit dans le cadre du programme Piren-Seine (Programme Interdisciplinaire de Recherche en Environnement sur la Seine), lancé par le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). L'objectif du Piren-Seine est de progresser dans la compréhension du fonctionnement de l'écosystème Seine. Améliorer les connaissances sur le transport et le stockage des matériaux de dragage dans le réseau hydrographique correspond à une volonté de faire le lien entre le fonctionnement de l'hydrosystème et les activités humaines sur le bassin versant. Ce programme sur les matériaux de dragage est réalisé en collaboration avec l'ensemble des acteurs du dragage sur le bassin de la Seine, à savoir les Voies Navigables de France (VNF), le Service de la Navigation en Seine (SNS) et l'Entreprise Morillon Corvol Courbot (EMCC). Cette collaboration s'est concrétisée, entre autre, par la mise en place d'un comité de thèse se réunissant tous les trimestres pour discuter des travaux de Sonia Carpentier. La thèse de Sonia Carpentier, que j'ai co-dirigé avec Daniel Thévenot, d'octobre 1998 à juin 2002, portait sur le suivi du site du Rouillard, commune de Verneuil sur Seine (78). Elle nous a permis de mieux appréhender les phénomènes qui entourent la gestion des matériaux de dragage dans le bassin de la Seine, où la mise en dépôt dans des sites en eaux, comme d'anciennes gravières, est majoritaire. La pratique du dragage d'entretien déplace chaque année dans le bassin de la Seine des volumes moyens de 150 000 m³. Ces sédiments accumulent des polluants et c'est pourquoi leur devenir soulève des questions environnementales que nous avons souhaité éclaircir. Une présentation détaillée des travaux sur cette thématique constitue la partie intitulée « Gestion des matériaux de dragage » de ce document.

La maîtrise de la pollution des Rejets Urbains de Temps de Pluie (RUTP) prend une place croissante dans les problèmes d'assainissement domestique et industriel. Les investissements dans ce domaine visent la préservation et la reconquête du milieu naturel, mais aussi l'application de la directive européenne relative au traitement des eaux urbaines résiduaires (Directive 91/271/CE du 21 mai 1991) qui impose le traitement des surverses unitaires pour les événements non exceptionnels. De plus, la nouvelle directive cadre européenne sur l'eau (Directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000) fixe un objectif clair pour 2015 : atteindre le bon état écologique des eaux souterraines et superficielles en Europe et réduire ou supprimer les rejets de certaines substances classées comme dangereuses ou dangereuses prioritaires. Toutes les sources de pollution doivent être connues et, si nécessaire, maîtrisées pour aboutir, à l'échéance prévue, au bon état écologique. La démarche imposée passe entre autres par « l'identification des pressions et l'étude des incidences de l'activité humaine sur l'état des eaux de surface. »

Dans ce contexte, depuis maintenant 1995, le Cereve a développé différents programmes de recherche afin d'améliorer les connaissances sur :

- Le fonctionnement des réseaux d'assainissement unitaires sur les plans quantitatif et qualitatif ;
- L'impact des rejets sur les milieux naturels et leur suivi dans le temps ;
- L'évaluation de la qualité des eaux usées collectées et son évolution le long du réseau en fonction de l'échelle considérée.

En partenariat avec la ville de Paris, le Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP) et l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN), deux programmes pluriannuels ont été élaborés. Entre 1994 et 2000, le programme « Génération et Transport de la Pollution des Rejets Urbains de Temps de Pluie en Réseau d'Assainissement Unitaire » visait à améliorer les connaissances concernant les sources, les caractéristiques et les mécanismes de génération et de transport de la pollution des RUTP sur le bassin versant urbain expérimental (BVUE) du Marais. En 2001, un nouveau programme de recherche « Observatoire des Polluants URbains » (OPUR) a débuté pour étudier l'évolution spatiale des caractéristiques et des origines des polluants dans les eaux de temps de pluie en réseau d'assainissement unitaire. Je me suis investi dans ces deux programmes dans lesquels j'ai pris la responsabilité du volet « hydrocarbures. » Les études menées sur cette thématique sont exposées dans la partie intitulée « Les micropolluants en milieu urbain anthropisé » de ce manuscrit. Trois niveaux d'investigations ont été abordés : le réseau, le bassin versant et l'agglomération. Les principaux résultats à ces différentes échelles ont été présentés dans la thèse de Ana Gonzalez (1996-2001), que j'ai co-encadré, à partir de 1998, avec Daniel Thévenot et dans celle de Vincent Rocher (2000-2003), dont j'ai assuré la direction par une dérogation accordée de Madame Lamicq, alors Présidente de l'Université Paris XII-Val de Marne. Ghassan Chebbo a participé au co-encadrement de cette dernière thèse.

Enfin, différentes perspectives de recherches sont présentées dans la partie « Les futurs projets de recherche. » Deux échelles de temps sont retenues : le court terme, qui concerne des perspectives qui s'inscrivent dans la continuité des programmes auxquels je participe, et le moyen terme, qui traite de nouvelles thématiques que je souhaiterais développer dans le cadre de mes activités scientifiques futures.

ETUDE DES SEDIMENTS ET DES SOLS EN MILIEU RURAL

I. Mesure des acides α -aminés dans les sédiments lacustres jurassiens

Dans le cadre de mon stage de DEA de Chimie-Physique, l'objectif fixé était de déterminer les acides α -aminés dans les sédiments lacustres jurassiens. Ces derniers font l'objet depuis 1983, au sein de l'Université de Franche-Comté, d'importants travaux de recherches ayant pour finalité une classification des lacs suivant leur mode de fonctionnement. Une recherche bibliographique sur les méthodes de dosage des acides α -aminés nous a orientés vers deux techniques :

- Une colorimétrique, permettant une détermination globale des aminoacides, aboutissant à un indice global exprimé en équivalent Glycine ;
- Une chromatographique, utilisant la Chromatographie Liquide Haute Performance (CLHP), permettant une quantification individuelle de chacun des aminoacides.

Les principes de dosage sont relativement identiques, ils nécessitent une dérivation. En effet, les acides α -aminés à l'état naturel sont de faibles chromophores dans la région du visible et de l'ultraviolet et ils ne possèdent pas de fluorescence intrinsèque. Ainsi il faut travailler avec un dérivé d'acide aminé qui soit bon chromophore ou fluorophore. En colorimétrie, les acides α -aminés réagissent avec de la ninhydrine pour former à pH 1,5 un complexe coloré, le pourpre de Ruhemann, qui est détecté à 572 nm (Figure 4).

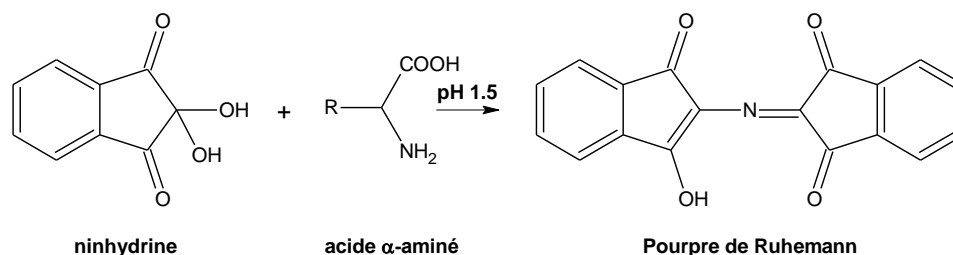


Figure 4. Dérivation à la ninhydrine des acides aminés

En chromatographie, les acides α -aminés réagissent avec le dialdéhyde orthophtalique (OPA) en présence de 2-mercaptoéthanol pour former un dérivé soufré de l'isoindole (Figure 5). La détection est réalisée soit en UV, à 336 nm, soit en fluorescence avec une longueur d'onde d'excitation de 340 nm et une longueur d'onde d'émission comprise dans la bande spectrale 420-650 nm.

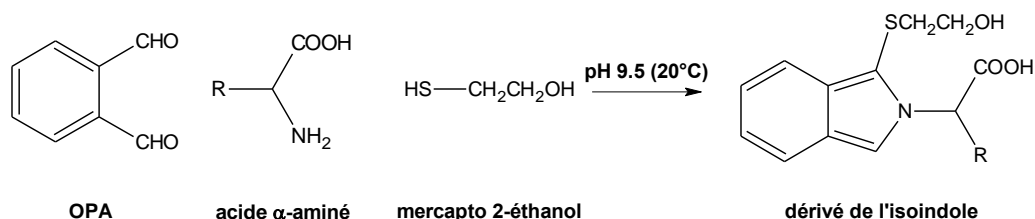


Figure 5. Dérivation post colonne au dialdéhyde orthophtalique (OPA) des acides aminés

La détermination des acides α -aminés est réalisée après décarbonatation du sédiment (attaque acide à pH 1,5). Cependant, il s'est avéré impossible d'appliquer les deux méthodes d'analyse directement sur le surnageant ainsi obtenu. Une étude approfondie des constituants essentiels du surnageant et de leur influence sur chacune des deux méthodes de dosage a montré que la teneur importante en calcium empêche la détection des aminoacides par formation d'un complexe (Moilleron *et al.*, 1996). Ceci n'avait jamais été mis en évidence auparavant. Il a donc été nécessaire d'éliminer du

milieu réactionnel le calcium. La précipitation des ions Ca^{2+} par l'oxalate de sodium $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ s'est avérée la meilleure solution. Un nouveau protocole a été défini, validé, son application a permis d'atteindre nos objectifs. Par ailleurs une comparaison entre les méthodes colorimétrique et chromatographique a montré leur complémentarité. La quantité globale d'acides α -aminés déterminée en colorimétrie par la méthode à la ninhydrine est équivalente à la quantité obtenue en réalisant la somme des acides α -aminés mesurés individuellement par CLHP. Les acides α -aminés les plus couramment rencontrés sont : les acides glutamique et aspartique, la sérine et la glycine. Ce travail a permis de mieux caractériser les différentes formes de la matière organique (MO) présente dans les sédiments lacustres jurassiens à matrice fortement calcaire et d'affiner les critères de classement des lacs jurassiens (Berrekhis, 1997).

II. Réétention d'herbicides par des sols : influence de la matière organique et de la température

Dans le cadre de mon doctorat de Chimie-Physique, qui s'est déroulé également au laboratoire de Chimie des Eaux de Besançon (25), le mécanisme de fixation d'herbicides par différents constituants des sols a été abordé. L'adsorption de quatre herbicides (Figure 6), une triazine et trois chlorophénoxyacides, a été étudiée sur trois matériaux issus de trois sols différents et sur quatre minéraux purs, une argile (kaolinite) et trois oxydes (silice, alumine et hématite). J'ai structuré ce travail en cinq parties :

- Une analyse bibliographique ;
- Une description des adsorbants, des herbicides et des techniques analytiques ;
- Une étude de la rétention des herbicides à 20°C ;
- Une étude de la relation entre les différentes formes de la Matière Organique (MO) et le pouvoir de rétention des sols ;
- Une description de l'influence de la température sur la rétention des herbicides.

Les sols, fournis par l'INRA de Dijon (21), ont été caractérisés en argileux, limoneux et sableux. Les herbicides suivants ont été étudiés :

- L'atrazine ou 6-chloro-N-éthyl-N'-(1-méthyléthyl)-1,3,5-triazine-2,4-diamine ;
- Le M.C.P.P. ou acide 2-(4-chloro-2-méthylphénoxy) propanoïque ;
- Le 2,4,5-T ou acide (2,4,5-trichlorophénoxy) acétique ;
- Et le 2,4-D ou acide (2,4-dichlorophénoxy) acétique.

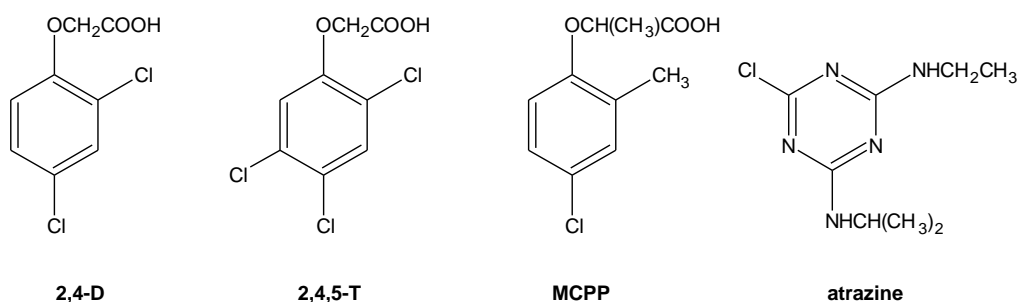


Figure 6. Herbicides utilisés pour leur adsorption sur les sols et leurs constituants

Une méthode d'analyse des herbicides a été développée pour notre étude. Sa mise en place et son optimisation ont été réalisées en collaboration avec le laboratoire de Chimie Analytique de la Faculté de Médecine et Pharmacie de Besançon (25). Il s'agit d'une méthode chromatographique en phase liquide avec détection UV (Cavalli *et al.*, 1996).

Tout d'abord, une étude de la rétention des herbicides par les différents solides a été réalisée à 20°C selon la méthode classique des restes. Son originalité résidait dans le domaine de très petites concentrations (<2 mg/L) auxquelles nous avons travaillé. Cette étude comprenait plusieurs phases :

- Une cinétique d'adsorption pour déterminer le temps au bout duquel le système atteint l'équilibre ;
- Le calcul des coefficients de partage K_d ;
- L'influence du pH sur l'adsorption ;
- L'influence de la force ionique sur l'adsorption.

Le coefficient de partage a été défini comme suit :

$$K_d = \frac{(X/m)}{C_{eq}}$$

avec (X/m) la capacité de fixation (en mg d'herbicide par kg de solide sec), C_{eq} la concentration à l'équilibre dans le surnageant (mg/l), K_d s'exprimant alors en l/kg.

L'analyse cinétique a permis de montrer que 24 h sont nécessaires pour atteindre l'équilibre de répartition des herbicides entre les phases solide et liquide. De plus l'allure des courbes de cinétique, qui lie la capacité de fixation des solides au temps, a montré que la fixation se déroule en deux étapes, une rapide dans les six premières heures suivie d'une plus lente. La première étape, rapide, correspond à une fixation où interviennent les sites extérieurs de surface qui sont les plus accessibles. Elle se déroule dans les premières heures et concerne 70 à 90% de la quantité maximale fixée. La seconde étape est beaucoup plus lente, la cinétique de fixation ralentissant pour devenir quasiment nulle. Cette fois un phénomène de diffusion au sein du solide intervient, les sites concernés étant beaucoup moins accessibles et donc la quantité fixée moindre. La capacité de fixation (X/m) des deux types de sites d'adsorption est proportionnelle à la concentration à l'équilibre en herbicides (C_{eq}), entre 200 et 900 µg/l, ce qui nous a permis d'estimer K_d .

Certaines de nos observations étaient similaires aux résultats déjà publiés à un niveau de concentration plus élevé en herbicides. Ainsi le comportement des phénoxyacides, vis-à-vis des matériaux terreux, est différent de celui des s-triazines. Ceci s'explique par les propriétés acido-basiques des herbicides : les phénoxyacides sont des acides faibles alors que les s-triazines sont des bases faibles. De plus pour les deux familles, les herbicides sont d'autant mieux retenus que le pH des suspensions matériaux terreux/solutions aqueuses est inférieur au pKa des herbicides. Notre travail a contribué également à une meilleure connaissance des mécanismes de rétention concernant l'influence de la nature du réseau cristallin des oxydes sur l'adsorption, le masquage vraisemblable des sites d'adsorption des oxydes dans le sol par la matière organique et le rôle des métaux avec la matière organique du sol. L'influence de la MO a été analysée avec un plus grand nombre d'adsorbants : les trois matériaux terreux du départ plus six autres solides, deux provenant de sols agricoles et quatre de sédiments lacustres.

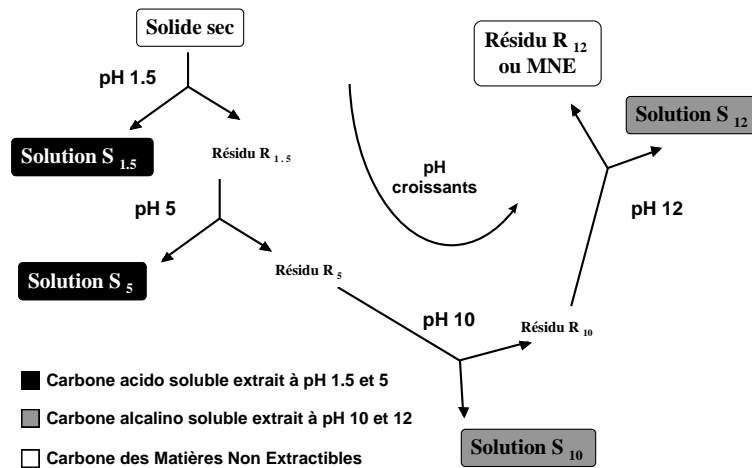


Figure 7. Fractionnement de la Matière Organique (MO) pour l'étude de l'adsorption des herbicides sur les sols

L'influence globale de la teneur en MO n'a pas apporté d'informations nouvelles : la rétention de l'atrazine est corrélée à la teneur en MO alors qu'il n'existe pas de relation pour le 2,4-D. En revanche, le fractionnement de la MO a mis en évidence certains éléments originaux. La méthode de fractionnement que nous avons utilisée consiste en une suite d'attaques du solide à des pH croissants et avec des réactifs appropriés permettant d'isoler trois types de MO (Figure 7) : la MO acidosoluble (MOACS) extraite à pH 1.5 et 5, la MO alcalinosoluble (MOALS) extraite à pH 10 et 12 et la MO non extractible (MONE). Ce fractionnement a permis de montrer, que pour les solides siliceux, K_d croît avec le rapport C_{MOACS}/C_{MONE} . A l'opposé, pour des solides à matrice calcaire, K_d décroît avec le rapport C_{MOACS}/C_{MONE} .

L'influence de la température montre que les quantités adsorbées ne croissent pas de façon monotone. L'analyse du passage en solution des matières organiques hydrosolubles est apparu comme une piste prometteuse en particulier pour expliquer, au moins partiellement les variations des K_d avec la température tant pour les phénoxyacides que pour les s-triazines.

Les études de désorption, menées suivant la méthode des dilutions successives, a montré l'absence de désorption. Cela a conduit à s'interroger sur la nature des interactions entre les herbicides et les surfaces adsorbantes, notamment pour les très faibles concentrations étudiées. Une double approche thermodynamique a montré que les échanges de chaleur consécutifs au phénomène d'adsorption sont faibles, laissant penser que les liaisons formées sont du type liaison hydrogène ou de London Van der Waals.

GESTION DES MATERIAUX DE DRAGAGE

I. La problématique

Le thème de recherche sur le devenir des matériaux de dragage s'inscrit dans le cadre du Programme Interdisciplinaire de Recherche en Environnement sur la Seine (Piren-Seine). Ce programme a pour objectif de mesurer, d'analyser et de modéliser le fonctionnement du système Seine. Le Groupement de Recherche Piren-Seine, né en 1989 d'une initiative du CNRS, a progressivement élaboré une formule originale d'organisation de l'activité scientifique dans laquelle les chercheurs interviennent directement dans nombre de dossiers techniques tout en menant une recherche fondamentale de pointe assurant la pérennité d'un potentiel d'expertise indépendante. Le Piren-Seine, récemment labellisé « Zone Atelier » par le Programme « Environnement, Vie et Sociétés » du CNRS, est en outre directement financé par l'ensemble des organismes publics ou privés intéressés à la gestion de l'eau dans le bassin de la Seine : Agence de l'Eau Seine-Normandie, DIREN Ile de France, Voies Navigables de France, Institution des Grands Lacs de Seine, Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de la Région Parisienne, Société Anonyme pour la Gestion des Eaux de Paris, Syndicat des Eaux d'Ile de France, Lyonnaise des Eaux, Union Nationale des Producteurs de Granulats. Y participent, de manière étroitement coordonnée, une centaine de chercheurs et ingénieurs du CNRS, de l'INRA, du CEMAGREF, du Cereve, et de diverses Universités et Instituts de recherche. Ses objectifs sont définis pour une période de 4 ans en étroite concertation entre chercheurs et gestionnaires. Une des avancées scientifiques les plus importantes du Piren-Seine est le développement d'une panoplie d'outils scientifiques permettant d'appréhender dans son ensemble le fonctionnement écologique de ce système anthropisé de dimension régionale que forme le réseau hydrographique de la Seine, ses aquifères et son bassin versant. Ces outils, qu'ils se présentent sous forme de bilans de matière ou de logiciels de simulation, visent à la fois à la compréhension des mécanismes qui gouvernent le fonctionnement des écosystèmes, et à la prévision de l'effet, en terme de qualité du milieu aquatique, des mesures de gestion des rejets polluants ou d'aménagement du paysage hydrologique. Le territoire que couvre le Piren-Seine correspond aux zones « Marne », « Oise » et « Seine-Amont » de la Figure 8.

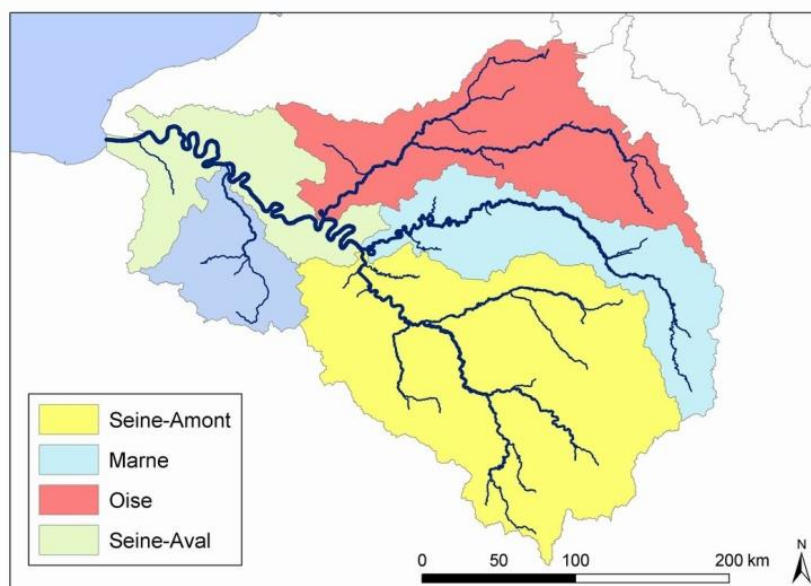


Figure 8. Limites géographiques du bassin de la Seine

La thématique concernant les matériaux de dragage a été initiée en 1998. Il s'agissait d'un sujet de recherche nouveau pour le Piren-Seine dont le Cereve a été l'instigateur. Pendant de nombreuses années en France, les connaissances fondamentales et pratiques concernant la gestion des sédiments dragués ont été limitées. Cette pauvreté était essentiellement due au manque de demande de la part des maîtres d'ouvrages. De plus, l'inexistence d'une réglementation adaptée a scellé, dans la majorité des cas, l'échec de toute tentative de gestion raisonnée des sédiments dragués. Plusieurs questions émergeaient alors, autour du dragage, sur la qualité et le volume des sédiments dragués, la réglementation en vigueur et le mode de gestion de ce type de matériaux (Figure 9). Les réponses à l'ensemble de ces questions devaient compléter les connaissances sur le fonctionnement du système Seine, au sens « Piren-Seine » du terme, à savoir de la source du fleuve à son estuaire à Poses (De Marsily *et al.*, 1998).

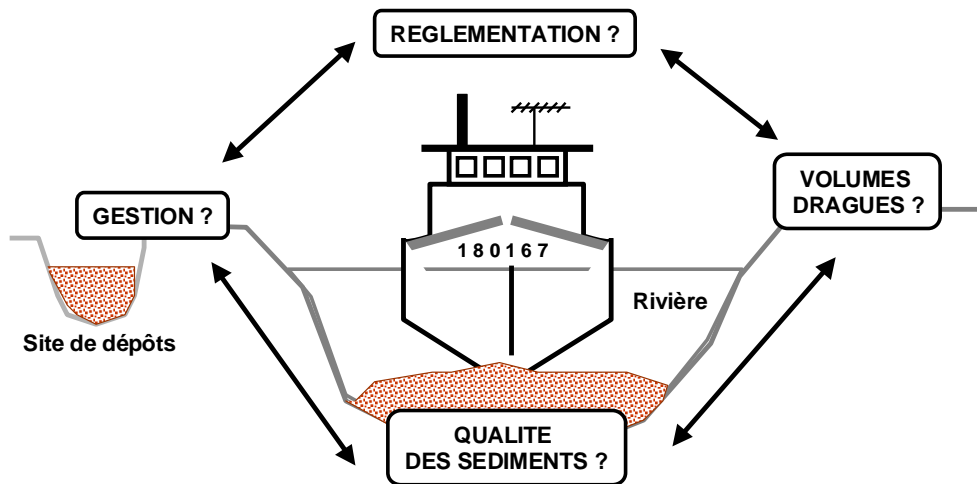


Figure 9. Problématique de la gestion des matériaux de dragage

Ce travail est conduit depuis le début en collaboration avec l'ensemble des acteurs du dragage sur le Bassin de la Seine Aval, à savoir les Voies Navigables de France (VNF), le Service de Navigation de la Seine (SNS) et l'Entreprise Morillon Corvol Courbot (EMCC). Voies Navigables de France (VNF) est un établissement public à caractère industriel et commercial. Il est en charge de la gestion du Domaine Public Fluvial ainsi que de l'exploitation, de l'extension et de l'entretien des voies navigables. Le Service de Navigation de la Seine (SNS) exerce ses fonctions sur l'ensemble des voies navigables du Bassin de la Seine. Il agit notamment pour le compte du Port Autonome de Paris (PAP) et de VNF. Le SNS est découpé en quatre arrondissements territoriaux (Figure 10) : Champagne (qui intègre une partie de la Marne), Picardie (qui comprend une partie de l'Oise), Boucles de la Seine (qui englobe partiellement la Seine et l'Oise) et Seine-Amont (qui regroupe une partie de la Seine, de la Marne et de l'Yonne). Ces arrondissements sont eux-mêmes structurés en subdivisions, et en arrondissements fonctionnels. C'est un service extérieur du Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer. Le Port Autonome de Paris (PAP), premier port fluvial français et deuxième port européen, est un établissement public qui a été créé en 1970 pour exploiter et développer les activités portuaires le long des voies navigables de l'Île de France. Le PAP est placé sous la tutelle du Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer, mais il gère son propre budget. Les trois principaux ports du PAP sont Gennevilliers, Limay-Porcheville et Bonneuil sur Marne. Le directeur général du PAP est aussi directeur du SNS et directeur régional de VNF en Île de France. De fait, une étroite collaboration entre ces trois établissements publics existe. VNF est responsable des activités de dragage des voies d'eau domaniales. Pour le bassin de la Seine, VNF délègue les travaux de dragage au SNS ; ces travaux font l'objet d'un marché soumis à appel d'offres. L'Entreprise Morillon Corvol Courbot (EMCC), principal entrepreneur des dragages dans le Bassin de la Seine, était détentrice du marché durant la première phase de ce travail. En

préambule à ce programme de recherche, tous les acteurs du dragage dans le bassin de la Seine (gestionnaires, sociétés de dragage et service de police des eaux) ont été réunis à l’initiative du Cereve ; cette discussion a permis de définir les attentes des uns et des autres. Un équilibre a été trouvé entre les objectifs économiques et techniques, spécifiques aux gestionnaires, et les objectifs de recherche, propres au Piren-Seine. Ainsi, les orientations scientifiques ont concerné l’évaluation de la qualité des sédiments destinés à être dragués dans le bassin de la Seine, les flux de matières déplacés annuellement, l’aspect réglementaire du dragage et de la gestion des matériaux dragués et enfin la recherche d’un site de dépôt sur lequel l’étude pourrait être menée.



Figure 10. Arrondissements SNS du bassin de la Seine

Un tour d’horizon de la situation dans le bassin de la Seine, en Europe et dans le reste du Monde a permis de dresser un inventaire, relativement exhaustif, des différentes réglementations internationales disponibles pour décider du devenir des matériaux dragués selon leur qualité et/ou toxicité (Carpentier, 2002). En parallèle, **une étude préalable de caractérisation de la qualité des sédiments** prélevés juste avant les campagnes annuelles de dragage d’entretien a été arrêtée en collaboration avec VNF et SNS. Depuis 1999, les sédiments destinés à être dragués sont caractérisés suivant des critères qui ont été proposés par le Cereve et avalisés par VNF. Les analyses sont conduites par des laboratoires accrédités COFRAC. Au début de notre collaboration, il n’y avait aucune obligation pour que les analyses soient réalisées par ce type de laboratoire, mais j’ai insisté pour qu’elles le soient. Nous avons ainsi anticipé la mise en place de la réglementation car désormais il y a obligation, pour les laboratoires répondant à des appels d’offres lancés par des organismes publics, d’être accrédités COFRAC. Les paramètres physico-chimiques globaux et les teneurs en micropolluants organiques mesurés permettent d’avoir une image plus précise du degré de contamination de ces sédiments. Cette connaissance est devenue un outil d’aide à la décision indispensable pour les gestionnaires car elle permet une gestion anticipée des matériaux dragués en accord avec la législation en vigueur. La qualité des sédiments dragués sur le bassin de la Seine a été synthétisée dans deux publications qui décrivent les caractéristiques physico-chimiques et le degré de contamination en micropolluants organiques et métalliques des sédiments destinés à être dragués (Carpentier *et al.*, 2002b; Carpentier *et al.*, 2002a) :

« Quality of dredged material in the river Seine basin (France). I Physico-chemical properties » S. Carpentier / R. Moilleron / C. Beltran / D. Hervé / D. R. Thévenot, *The Science of Total Environment*, 2002 295 : 101-113. [1]

« Quality of dredged material in the river Seine basin (France): II Micropollutant » S. Carpentier / R. Moilleron / C. Beltran / D. Hervé / D. R. Thévenot, *The Science of Total Environment*, 2002 299(1-3) : 57-72. [2]

Les principaux résultats pour les caractéristiques physico-chimiques, les teneurs en éléments métalliques et en micropolluants organiques sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques des sédiments dragués sur le bassin de la Seine (1996-2000)

		n	d10	d50	d90	min	max	moyenne	Ecart type	CV (%)
COT	g/kg	33	16	37	59	11	81	37	17	45
densité		46	1,20	1,44	1,73	1,04	1,91	1,47	0,20	14
Humidité	%	64	26	49	69	14	75	47	16,7	35
MO	%	64	1,4	6,8	18	0,8	26	8,5	6,5	77
<50 µm	%	63	1,3	13	59	0	77	21	22	106
As	mg/kg	41	<5	<5	11	<5	13	3,8	4,9	129
Cd	mg/kg	42	<0,8	0,8	2,0	<0,8	6	1,1	1,1	107
Cr	mg/kg	32	10,1	32	61,6	4	78	32,5	20,0	62
Cu	mg/kg	50	0	31,5	120,2	<5	172	49,3	44,4	90
Hg	mg/kg	50	0,15	0,45	3,06	<0,05	24	1,65	4,1	247
Ni	mg/kg	50	3,6	17	24	<5	30	14,7	8,4	58
Pb	mg/kg	50	23,1	52	152,6	<5	278	72,0	57,2	79
Zn	mg/kg	50	79,9	189	382	39	563	210	123	59
Al	mg/kg	33	2280	6100	32126	1562	36148	12371	11780	95
Fe	mg/kg	33	5360	15100	36503	2300	39859	18362	12291	67
Mn	mg/kg	33	18,2	50	479	9	509	199	195	98
HCtot	mg/kg	61	21	194	794	3	1252	302	330	109
HAP	mg/kg	38	3,4	6,7	20,5	1,4	84	10,9	13,9	127
alcanes	mg/kg	33	<2	13	54	<2	133	23	27	118
PCB	mg/kg	20	<0,005	0,03	1,3	<0,005	22,9	1,4	5,2	367
Pesticides	mg/kg	15	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	-	-
Toluène	mg/kg	15	0,2	0,5	1,5	0,2	2,6	0,8	0,7	91
Phénols	mg/kg	20	1,5	3,0	4,6	1,1	5,0	3,0	2,8	90

Pourquoi draguer ? En milieu fluvial, le phénomène naturel d'érosion des sols et des berges provoque une sédimentation entraînant des dépôts de particules dans les zones où la vitesse d'écoulement est plus faible. Ainsi, les zones privilégiées de dépôt se trouvent à l'amont et/ou à l'aval direct des ouvrages (écluses, barrages...). Ces dépôts génèrent des accumulations de sédiments, qui peuvent devenir un obstacle à la navigation et à l'écoulement des eaux. Elles peuvent, par exemple, accentuer les risques d'inondation lors des crues. Le dragage, c'est-à-dire l'extraction des sédiments aux différents endroits où ils se sont accumulés, constitue le remède temporaire aux conséquences de ce phénomène naturel. Ainsi, les opérations de dragage de ces rivières sont cruciales pour l'entretien des chenaux de navigation ainsi que lors de certains travaux d'aménagement. Dans les rivières soumises à la pression anthropique, les sédiments sont généralement pollués et peuvent agir comme une source, à long terme, de contaminants pour les eaux de fond (Petersen *et al.*, 1996). Ces dragages ont donc des conséquences environnementales : par exemple la remise en suspension des sédiments entraîne une augmentation de la turbidité et la remobilisation des polluants lors de l'oxydation de sédiments anoxiques (Vale *et al.*, 1998) ; par contre, les matériaux prélevés par dragage ne présentent plus une fois déposés loin du fleuve, d'impact direct sur la qualité de l'eau et des MES atteignant le littoral.

Mais une fois prélevés quel est le devenir de ces produits de dragage ? Les sédiments, une fois dragués, doivent être pris en charge. Plusieurs alternatives sont à la disposition du gestionnaire. Les

matériaux dragués peuvent être stockés sur place (généralement à proximité du site de dragage), traités sur place, transportés puis stockés ou encore transportés puis traités (Palermo, 1998). Lors des campagnes annuelles de dragage de la Seine et de l'Oise en aval des zones les plus industrialisées, les matériaux dragués, de nature organique, contaminés en micropolluants (métalliques et organiques) sont mis en dépôt à sec ou dans d'anciennes gravières généralement remplies d'eau. Dans ce dernier cas, les sédiments dragués sont transportés par barge jusqu'aux abords du dépôt. Ils sont alors dilués avec de l'eau de Seine (à 90%) et entraînés dans le dépôt via une conduite, depuis un bateau-refouleur posté sur la Seine à une certaine distance du plan d'eau. La conduite se prolonge dans le bassin par une canalisation maintenue par des flotteurs. Celle-ci est flexible, ce qui permet de la déplacer, et de remblayer le bassin de façon à ce que le matériau soit réparti uniformément. Ainsi, au cours de la campagne de dragage et durant toute la période de remplissage du site de dépôt, elle est déplacée régulièrement. Les eaux, apportées avec les matériaux de dragage, sont rejetées dans la Seine via un déversoir. Lors de leur dragage, transport, et refoulement sur ces sites mais aussi lors de leur stockage, ces matériaux contaminés sont donc susceptibles de relarguer différents types de polluants, des nutriments ou des micropolluants, dans la colonne d'eau, dans la rivière ou dans la nappe phréatique. Un risque d'altération de la qualité des eaux superficielles du site de dépôt et de la nappe phréatique affleurante sont possibles. L'objectif de ce programme de recherche est donc d'évaluer l'impact de la mise en dépôt des matériaux de dragage dans d'anciennes gravières. L'enjeu est de savoir si l'option retenue par VNF sur le bassin de la Seine, à savoir des sites de dépôt en eau, est une bonne alternative environnementale. Economiquement la réponse est positive car l'utilisation de sites de dépôt proches de la Seine limite les coûts de transport et donc le coût global du dragage. Elle offre aussi une plus grande souplesse sur le transport car elle évite de mettre, sur les routes franciliennes, un nombre important de camions aux capacités nominales inférieures à celles des barges.

II. Le dragage dans le bassin de la Seine

II.1 Historique des volumes dragués

Les deux principaux organismes concernés par la nécessité de draguer, dans le bassin de la Seine, sont les Voies Navigables de France (VNF) et le Port Autonome de Paris (PAP). L'accès des ports par le chenal et la configuration de certaines zones portuaires propices au dépôt de sédiments expliquent la contribution du PAP au dragage. Cette contribution est relativement peu importante par rapport à celle de VNF dans le bassin de la Seine mais les matériaux dragués pour le compte du PAP sont souvent plus contaminés que ceux dragués pour VNF. La moyenne des volumes dragués par VNF sur les quinze dernières années est de $140\,752\text{ m}^3/\text{an}$ ($\pm 50\,998\text{ m}^3/\text{an}$) soit un total de $2\,111\,282\text{ m}^3$ pour la période 1989 - 2003. (Figure 11). Les volumes dragués pour le compte de VNF sont 8 fois supérieurs à ceux dragués pour le PAP.

Une comparaison entre les flux de matériaux de dragage déplacés annuellement et les flux annuels de MES, évalués à Poses (27), qui correspondent à la contribution du bassin de la Seine dans sa globalité, permet d'évaluer l'importance de la pratique du dragage dans l'écosystème Seine. La station de Poses ferme le bassin de la Seine en amont de son estuaire (67500 km^2 hors le bassin versant de l'Eure qui rejoint la Seine quelques kilomètres en aval du barrage de navigation) : cette station a fait l'objet d'une surveillance particulière dans le cadre du Réseau National de Bassin (RNB), mais aussi d'une étude pilote de l'Ifremer, du SNS de Rouen et du Laboratoire municipal de Rouen (Cossa *et al.*, 1994). Lors de l'année hydrologique 1994-95, ce site a été l'objet d'un suivi particulier par plusieurs équipes du Piren-Seine. Ainsi, les volumes dragués annuellement pour le compte de VNF représentent un flux de matières correspondant à 48 % (en médiane) des flux annuels de MES mesurés à Poses entre 1989 et 1999, flux qui varient entre $161\,000\text{ t}$ et $1\,335\,000\text{ t}$ (Thévenot *et al.*, 2002).

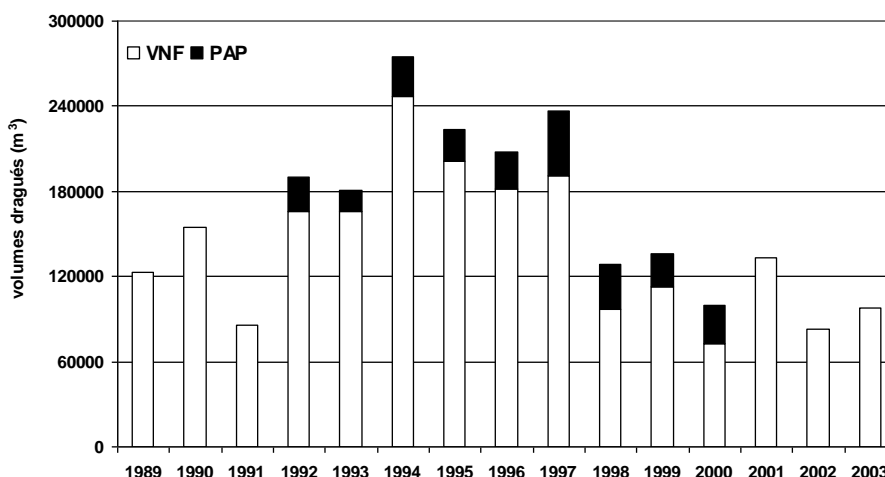


Figure 11. Volumes dragués annuellement par VNF et PAP sur le bassin e la Seine entre 1989 et 2003

II.2 Flux de micropolluants générés par le dragage

A partir des résultats obtenus lors des campagnes de caractérisation des sédiments avant dragage, entre 1999 et 2001 pour les sédiments VNF et 1997 pour les sédiments PAP (il ne nous a pas été possible d’obtenir d’autres données sur la qualité des matériaux dragués par le PAP), nous avons déterminé les masses d’hydrocarbures et de métaux (Cr, Pb, Zn, Cd, Ni, Hg et Cu) annuellement déplacés par le dragage. Ces flux ont été estimés à partir des médianes des teneurs en micropolluants, de la masse volumique et de la siccité des sédiments et des volumes dragués annuellement, comme suit :

$$\phi = [P] \times V \times \rho \times S \times 10^{-6}$$

avec Φ le flux (t/an) de matières sèches (ms), [P] la teneur en micropolluants (mg/kg.ms), V les volumes dragués annuellement (m³/an), ρ la masse volumique des sédiments (kg/l), S la siccité (% du poids brut). L'ensemble des résultats de ces calculs est regroupé dans le Tableau 2.

Tableau 2. Bilan des flux en micropolluants prélevés par dragage sur le bassin de la Seine (t/an) en 1996

	PAP		VNF				Total	Total
			Seine aval	Seine amont	Yonne	Marne		
HC tot	15,5	11,7	1,5	1,8	0,6	2,9	18,4	33,9
Cr	0,85	2,17	0,06	0,02	0,10		2,35	3,20
Pb	2,09	15,01	0,64	0,56	0,21		16,42	18,51
Zn	7,10	24,30	0,85	0,71	0,52		26,37	33,47
Cd	0,06	0,12	0,02	0,005	0,01	0,01	0,15	0,21
Ni	0,37	0,40	0,06	0,02	0,02	0,02	0,50	0,87
Hg	0,02	0,27	160 10 ⁻⁶	42 10 ⁻⁶	50 10 ⁻⁶	128 10 ⁻⁶	0,27	0,29
Cu	1,73	7,90	0,30	0,06	0,17	0,13	8,43	10,16

Pour 1996, année pour laquelle nous possédons les données les plus complètes tant pour VNF que pour le PAP, les flux annuels estimés en hydrocarbures totaux aliphatiques (Tableau 2 et Figure 12) sont du même ordre de grandeur avec respectivement 15,5 t/an pour le PAP et 18,4 t/an pour VNF, alors que les volumes dragués pour le compte de VNF sont 7 fois supérieurs à ceux dragués pour le PAP : 181 717 m³ contre 26 480 m³. Ceci s’explique par des teneurs mesurées sur les sédiments dragués dans les ouvrages portuaires plus fortes (Tableau 3). Les sédiments PAP ont une teneur médiane de 913 mg/kg.ms en hydrocarbures totaux aliphatiques alors que celle des sédiments VNF est de 194 mg/kg.ms (Carpentier *et al.*, 2002b). La nature de l’activité portuaire, le chargement et le déchargement de marchandises, entraîne des temps de séjour plus longs des bateaux à quai, et

génère un enrichissement des sédiments portuaires en hydrocarbures. De plus, parmi les différents sédiments VNF, les sédiments « Seine Aval » sont les plus contaminés en éléments métalliques alors que les sédiments de l'Yonne sont les plus riches en hydrocarbures. Les sédiments PAP, quant à eux, présentent des teneurs plus élevées que les sédiments VNF pour l'ensemble des polluants à l'exception du mercure.



Figure 12. Répartition des flux déplacés par le dragage entre VNF et le PAP pour l'année 1996

Pour les métaux (Figure 12), nous observons une tendance différente. Le flux métallique annuel, somme des flux annuels de Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn, est beaucoup plus important pour VNF que pour le PAP : 54,7 t/an contre 12,2 t/an. Toutefois, le rapport des flux métalliques VNF/PAP reste inférieur à celui des volumes dragués, 4,5 contre 7. Les différences de teneurs en éléments métalliques expliquent en partie ce résultat (Tableau 3), car les sédiments PAP, quel que soit le métal considéré, sont en moyenne deux fois plus contaminés que les sédiments VNF (Figure 13).

Tableau 3. Teneurs médianes en micropolluants des matériaux dragués sur le bassin de la Seine (mg/kg.ms)

	PAP*	VNF*					VNF**
		Seine aval	Seine amont	Yonne	Marne	Oise	Carpentier
HC totaux	913	118	91	431	121	225	194
Cr	50	22	4	4	20	-	32
Pb	123	152	40	135	42	-	52
Zn	418	246	53	170	104	-	189
Cd	3,6	1,2	1,2	1,2	1,2	-	0,8
Ni	22	4	4	4	4	-	17
Hg	1,4	2,8	0,01	0,01	0,01	-	0,45
Cu	102	80	19	14	34	-	32

* : données 1996 ;** : teneurs médianes sur la période 1996-2000 (Carpentier *et al.*, 2002b).

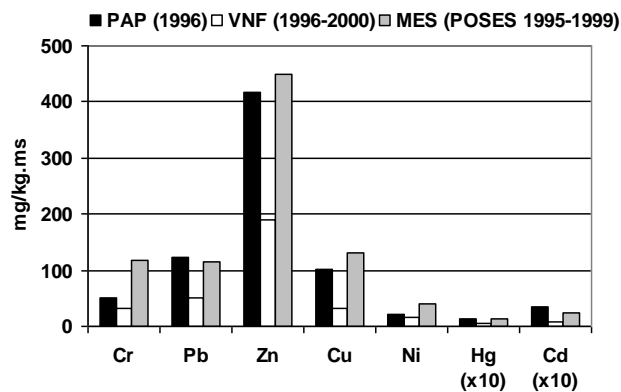


Figure 13. Comparaisons des teneurs métalliques médianes des sédiments VNF (1996-2000) et PAP (1996), avec celles des MES à Poses (1995-1999)

Les flux métalliques générés par le dragage, en 1996, ont été comparés à ceux évalués à Poses. Suivant le métal concerné, la pratique du dragage (somme des contributions du PAP et de VNF) déplace annuellement des flux compris entre 1,7 % (pour Ni) et 21,7 % (pour Hg) des flux métalliques de la Seine estimés à Poses (Tableau 4). Ainsi, les flux, que le dragage contribue à déplacer, sont loin d'être négligeables et doivent donc être intégrés dans les calculs de bilans ou les différents cycles concernant les éléments métalliques et les hydrocarbures. Les autres pratiques de gestion étant très limitées dans le bassin de la Seine, les matériaux de dragage sont majoritairement déplacés du lit de la rivière vers des sites de stockage à sec ou en eau, comme d'anciennes gravières par exemple. La connaissance du devenir de ces matériaux lors de leur stockage dans ces sites en eaux, généralement proche de la rivière, revêt un intérêt écologique et scientifique afin d'évaluer l'impact réel du dragage sur l'écosystème Seine. Les volumes dragués sont connus (par l'intermédiaire du PAP et de VNF), la qualité des sédiments également, mais il n'existe aucune information sur le devenir à long terme de sites de dépôts en eau et le degré exact de confinement des matériaux de dragage. Or cette dernière information ne peut être obtenue qu'en travaillant sur un site où tous les paramètres seraient suivis depuis les premiers dépôts.

Tableau 4. Comparaison des flux annuels (t/an) générés par le dragage avec les flux de la Seine estimés à Poses

	VNF + PAP	Poses*	Poses**	Poses***	%*	%**	%***	% moyen
HC totaux	33,9							
Cr	3,2	106	105	115	3,0	3,0	2,8	2,9
Pb	18,5	116	124	97	16,0	15,0	19,1	16,7
Zn	33,5	642	344	466	5,2	9,7	7,2	7,4
Cd	0,2	6	3,0	2	3,8	7,7	11,5	7,7
Ni	0,9	82	33	70	1,1	2,8	1,3	1,7
Hg	0,3	2	1,3	1	14,2	22,4	28,4	21,7
Cu	10,3	153	93	145	6,7	11,0	7,1	8,3

* : flux moyen sur eaux brutes sur la période 1976 - 2000 (données RNB) ; ** : flux moyen 1983 - 1999 (données Meybeck) ; *** : flux moyen sur eaux brutes pour 2000 (données RNB).

II.3 La gestion des matériaux de dragage

La majorité des sédiments dragués, dans le bassin de la Seine, sont dirigés vers des sites de dépôt, proches de la voie d'eau. Ceux-ci sont de deux types :

- Les dépôts à sec : Brenouille (sur l'Oise) et, Les Damps, Sandrancourt et Notre Dame de la Garenne (sur la Basse Seine) ;
- Les dépôts en eau : Triel sur Seine, Bernières sur Seine et Verneuil sur Seine. Ces trois derniers sites sont situés sur la Seine à l'aval de Paris (arrondissement Basse Seine).

La Figure 14 illustre la répartition des sédiments dragués depuis 1992 entre les différents sites de dépôt disponibles sur le bassin de la Seine. Le confinement des matériaux de dragage dans des sites en eau est nettement majoritaire dans le bassin de la Seine. En effet, entre 1992 et 2003, il a été dragué environ 1 700 000 m³ de sédiments VNF dont 70 % ont été entreposés dans les trois sites de dépôts en eau. Le site de Triel sur Seine, exploité de 1992 à 1998, a reçu 641 048 m³ de matériaux de dragage. Le site du Rouillard, situé à Verneuil sur Seine, exploité de 1999 à 2001, a reçu pour sa part 190 278 m³. Ces deux sites ne sont plus en fonctionnement car leur capacité de remblayage a été atteinte. L'exploitation de Bernières, débutée en décembre 1998, se poursuit. Ce site a reçu 346 540 m³ de matériaux de dragage entre 1998 et 2003. Les dépôts à sec ont stocké environ 30 % des volumes dragués sur la période 1992 - 2003. Quatre sites sont concernés pour des capacités nominales variant de 60 000 m³ (pour le site de Sandrancourt) à 200 000 m³ (pour le site de Notre Dame de La Garenne).

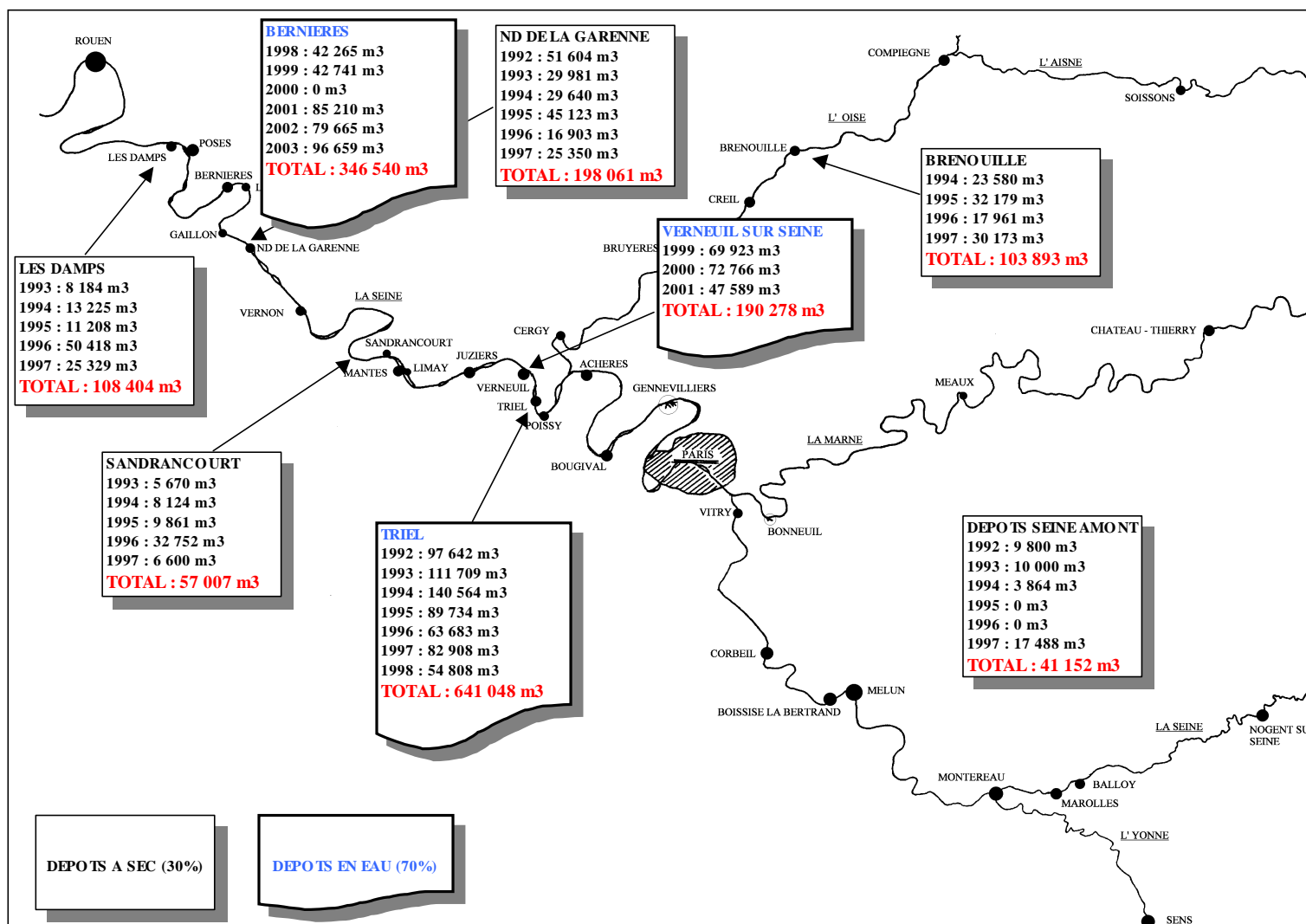
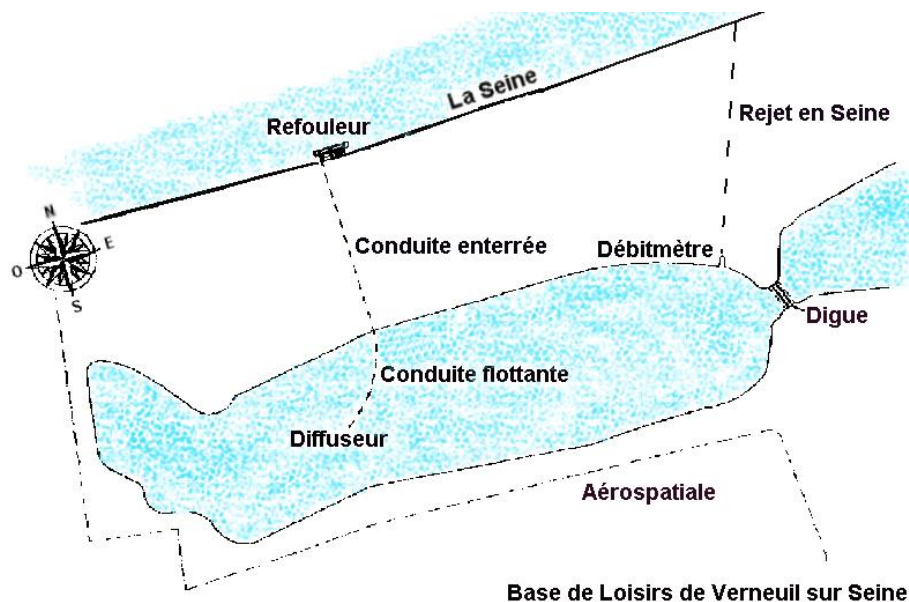


Figure 14. Sites de mise en dépôt des matériaux de dragage sur le bassin de la Seine (période 1992 - 2003).

III. Impact environnemental de la mise en dépôt de matériaux de dragage

III.1 Le site du Rouillard

Afin d'évaluer l'impact sur l'environnement des matériaux de dragage (MD) mis en dépôt dans des sites en eau, nous avons étudié deux sites de dépôt. En 1998, nous nous sommes, dans un premier temps, intéressés au site de Triel sur Seine (78), un ancien site de dépôt partiellement comblé par 640 000 m³ des matériaux de dragage entre 1992 et 1998. Il s'agissait donc d'une étude *a posteriori*. Les résultats de ce travail se sont révélés difficilement exploitables pour statuer sur l'impact des matériaux stockés compte tenu des différents apports parasites non contrôlables qui alimentaient ce site (drains des champs d'épandage de la Ville de Paris et autres effluents industriels alentours, ainsi que des dépôts sauvages). Il est alors apparu nécessaire de se focaliser sur l'étude d'un nouveau site de dépôt dont tous les paramètres seraient maîtrisés. Le site retenu, celui du Rouillard, situé dans la base de loisirs de Verneuil sur Seine (78) a une superficie de 9 hectares et une capacité estimée à 200 000 m³. Il a accueilli ses premiers dépôts de matériaux de dragage fin juin 1999 et son remblayage s'est achevé en septembre 2001.



(a) représentation schématique du site



(b) vue d'ensemble du site



(c) conduite flottante



(d) digue

Figure 15. Site du Rouillard pour le dépôt des matériaux de dragage du bassin de la Seine entre 1999 et 2001

En mars 1999, un état « zéro » a été réalisé, avant que ne débute le remblayage du site, pour connaître la qualité des eaux superficielles et des sédiments. Les résultats ont montré que les eaux superficielles et les sédiments de l'étang n'étaient pollués ni en hydrocarbures, ni en métaux. L'impact de la mise en dépôt de matériaux de dragage a été évalué par la mise en place d'un suivi des eaux superficielles de l'étang du Rouillard, des eaux de la nappe phréatique affleurante au dépôt, des sédiments déposés et de leurs eaux interstitielles. Ces différents échantillons ont été collectés régulièrement de juillet 1999 à septembre 2001 (Carpentier, 2002). Trois piézomètres

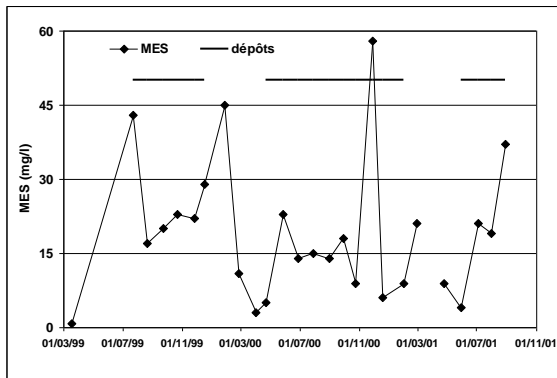
classiques ont été installés autour de l'étang pour évaluer le sens d'écoulement des eaux de la nappe phréatique. Un quatrième piézomètre a été spécialement mis en place pour suivre la qualité des eaux interstitielles du dépôt. De nombreux micropolluants organiques (hydrocarbures totaux et HAP) et métalliques (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb et Zn) ont été mesurés ainsi que certains paramètres physico-chimiques (pH, rH, les différentes formes de l'azote, P total, COP, COT, etc.).

Cette première phase de l'étude a permis de mieux appréhender les phénomènes qui accompagnent la période de remplissage du site de dépôt. Cette phase consiste en une alternance de périodes avec des dépôts et de périodes hivernales, dites de repos, sans dépôt. Ces dernières se produisaient notamment lors des épisodes de crues, qui empêchaient à la fois la navigation des barges et le dragage en lui-même (Carpentier *et al.*, 2002c). Un suivi de la chlorophylle *a* durant plus de 6 mois, de février à septembre 2001, a permis d'évaluer l'impact de la pratique de mise en dépôt sur la qualité biologique de l'étang. Pour cette dernière approche, nous avons utilisé la partie de l'étang n'ayant pas été remblayée par des MD comme situation de référence.

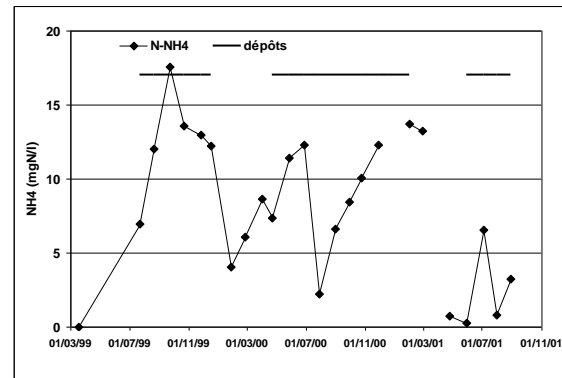
III.2 La phase de remplissage du Rouillard (1999 - 2001)

L'impact majeur de la mise en dépôt de MD sur la qualité des eaux superficielles de l'étang s'est avéré être l'apport de nutriments et de carbone organique et, en particulier, l'apport d'ammonium : les concentrations relevées dans les eaux superficielles de l'étang ont atteint 18 mg N-NH₄⁺/l. En effet, la taille de l'étang et l'apport de matériaux de nature organique favorisent le processus d'ammonification. Cet apport entraîne une eutrophisation de l'étang confirmée par les mesures hebdomadaire de chlorophylle *a* de février à septembre 2001. Les concentrations de chlorophylle *a* observées dans la partie remblayée de l'étang (atteignant 140 µg/l) sont significativement supérieures à celles de la partie non remblayée de l'étang (maximum = 18 µg/l). Les analyses de micropolluants dans les échantillons d'eaux superficielles ont clairement montré, tout au long de la période de suivi, que ces polluants, bien que présents à des teneurs significatives dans les MD introduits dans l'étang, n'ont pas été relargués vers les eaux superficielles : les concentrations retrouvées dans les eaux de l'étang n'ont que très rarement dépassé les limites de détection des méthodes analytiques utilisées.

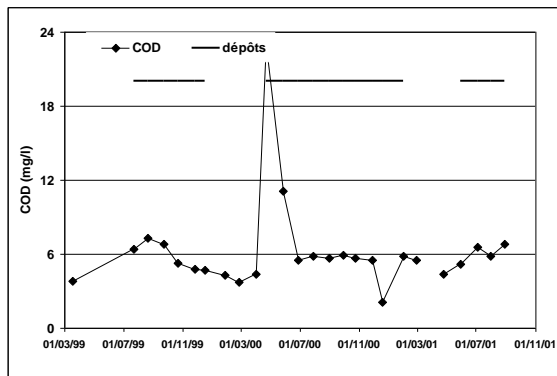
Les dépôts dans l'étang jouent un rôle important dans la mobilisation des polluants suite à la mise en dépôt de MD dans l'étang du Rouillard. En effet, ils sont le siège de nombreuses réactions anaérobies et plus généralement de la diagenèse qui englobe des procédés biologiques et/ou physico-chimiques qui tendent à minéraliser le dépôt. Nous avons mis en évidence l'activité ammonifiante (production d'ammonium) et dénitrifiante (consommation de nitrates) du dépôt notamment lors de l'observation de l'évolution temporelle de la qualité des eaux interstitielles au sein du dépôt. Nous avons également constaté la dégradation de la matière organique de ce dépôt entraînant la production de carbone organique dissous et de phosphore dans la colonne d'eau. Par ailleurs, le dépôt s'est comporté comme un puits de micropolluants : nous avons effectivement constaté l'absence, à court terme, de relargage de micropolluants vers les eaux de surface ainsi qu'une accumulation des ces polluants à la surface du dépôt : par exemple, les teneurs en Zn à la surface des sédiments de l'étang sont passées de 42 mg/kg avant les premiers remblais (mars 1999) à 1380 mg/kg après remplissage complet de l'étang (octobre 2001). Toutefois, à plus long terme, nous pensons que les micropolluants qui sont encore retenus par les MD pourraient être relargués dans la colonne d'eau suite à une réduction des oxy-hydroxydes de Fe et de Mn présents en surface des sédiments.



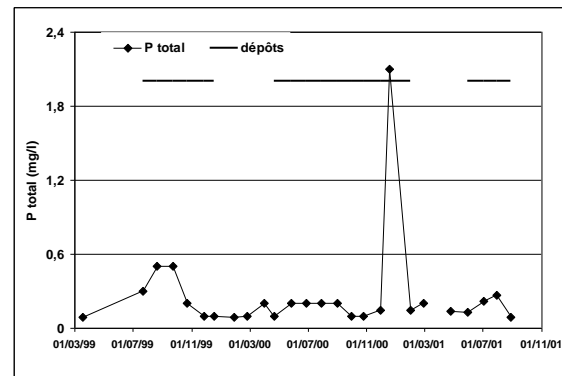
(a) évolution des MES



(b) évolution de NH_4^+



(c) évolution du COD



(d) évolution du phosphore total

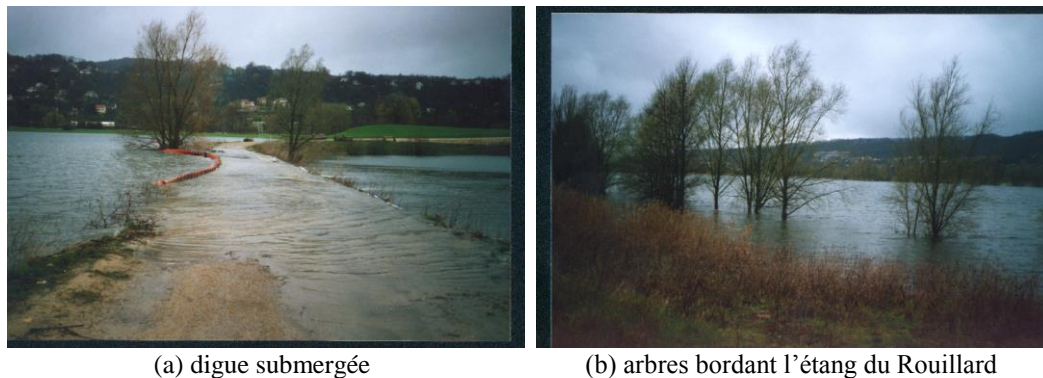
Figure 16. Impact de la phase de remplissage (1999 - 2001) sur les eaux de surface de l'étang du Rouillard

D'après les niveaux piézométriques relevés autour de l'étang, nous avons déterminé le sens d'écoulement de la nappe. La tendance qui se dégage est l'existence de 2 sens d'écoulement suivant les conditions hydrographiques. L'un est parallèle à l'écoulement de la Seine, et dans le sens de sa pente, alors que l'autre est perpendiculaire à cet axe, dans le sens d'un écoulement de la Seine vers l'étang du Rouillard. Le suivi des eaux de la nappe phréatique, échantillonnées grâce aux trois piézomètres, a permis de constater que la qualité de la nappe n'a été que très peu altérée par le remplissage. Les principaux faits observés ont été des pics de concentration en ammonium (maximum : 4 mg NH_4^+ /l) imputés au remblayage de l'étang, et, de façon moins claire, des apports en Phosphore total (maximum : 4,5 mg P/l) dus à la Seine.

L'ensemble de ces observations nous a conduit à faire des propositions pour améliorer la gestion de la mise en dépôt de matériaux de dragage dans le bassin de la Seine :

- La présence d'un bassin de décantation à l'amont du trop plein en Seine éviterait le retour dans la rivière de concentrations importantes en MES lors de la phase de remplissage, même si globalement sur les 150 000 tonnes déposées moins de 0,1% sont retournées dans la Seine.
- Le remblayage des matériaux par voie sèche serait préférable au mode utilisé aujourd'hui qui consiste à diluer fortement (~ 10 fois) les matériaux avec de l'eau de Seine. Ceci permettrait de limiter les modifications brutales des conditions physico-chimiques au sein du matériau lors de sa mise en dépôt.
- Il serait utile de limiter les relations entre le site de dépôt et la rivière, soit par éloignement physique de celui-ci, soit par surélévation ou construction de digues, permettant d'éviter l'impact des crues de la Seine sur le site, comme nous avons pu le constater avec le Rouillard à plusieurs occasions (Figure 17).

- La mise en place d'une géomembrane au fond du site de dépôt permettrait l'imperméabilisation totale du site, évitant ainsi toute contamination de la nappe phréatique.



(a) digue submergée

(b) arbres bordant l'étang du Rouillard

Figure 17. Exemple de la crue de mars 2001

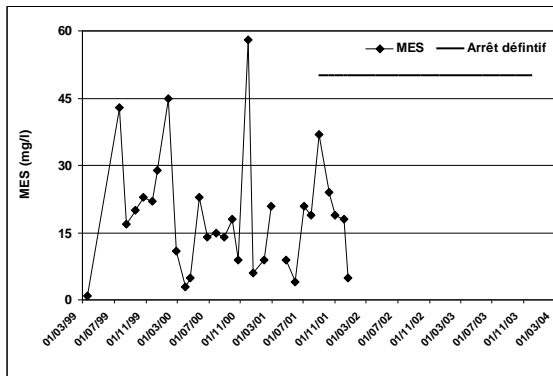
Les résultats de ces trois années de suivi du Rouillard durant sa phase de remplissage ont été synthétisés pour les eaux superficielles de l'étang du Rouillard et la qualité des dépôts de l'étang sous la forme d'actes d'un colloque international en 2001 :

« Fate of dredged contaminated sediments in an underwater disposal site » S. Carpentier / R. Moilleron / D. Thévenot, 1st International conference on remediation of contaminated sediments (Venise), octobre 2001. [3]

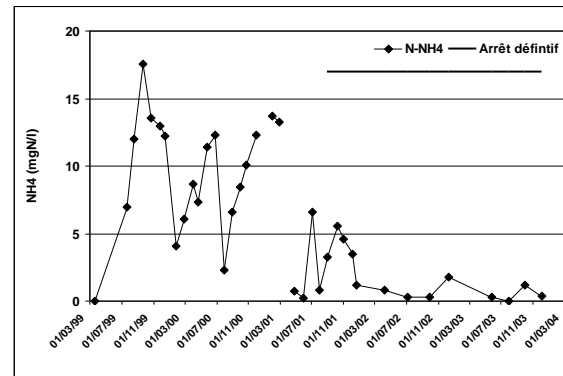
III.3 Evolution à moyen terme du Rouillard (2001 - 2003)

Au cours de la première phase de ce programme nous avons mis en évidence les phénomènes observés à court terme lors du remblayage l'étang du Rouillard. Cependant, un certain nombre de points restent à approfondir. Par exemple, nous pensons qu'il est nécessaire de poursuivre le suivi de l'étang du Rouillard après son remplissage afin d'étudier le devenir des matériaux déposés à moyen terme : les polluants stockés dans le dépôt resteront-ils fixés aux sédiments de l'étang ou seront-ils relargués vers les eaux de surface ou les eaux de nappe ? Les fortes concentrations en ammonium observées perdureront-elles ? L'eutrophisation observée va-t-elle s'atténuer ?

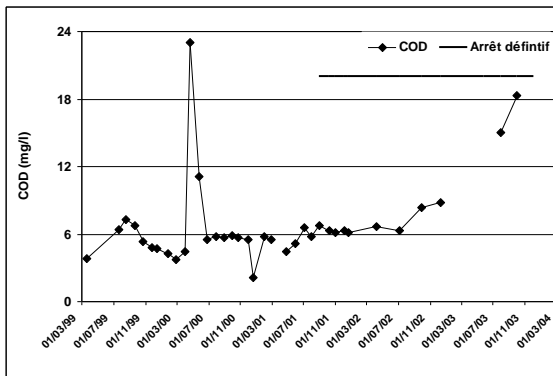
En conséquence, depuis octobre 2001, date des derniers dépôts, une nouvelle stratégie a été adoptée pour suivre l'évolution du site. La fréquence d'échantillonnage pour l'évaluation des paramètres physico-chimiques a été réduite, de mensuelle durant la première phase, elle est devenue trimestrielle. De plus, un volet biologique a été introduit avec l'établissement d'une collaboration avec le Laboratoire de Biologie, des Sols et des Eaux (LBSE) de l'Université Paris XII-Val de Marne. Le zooplancton et le phytoplancton sont désormais caractérisés sur les eaux superficielles du Rouillard. La mesure d'un indice habituellement testé en rivière, l'Indice Biologique Diatomée (IBD), a été appliqué aux eaux de surface du Rouillard pour suivre son degré d'eutrophisation, basé jusqu'alors sur la mesure de paramètres physico-chimiques. Une comparaison a été réalisée avec la partie non remblayée du site, qui correspond à la partie « base de loisirs. » Cette partie sert de référence afin d'estimer l'impact réel des matériaux de dragage sur l'évolution des paramètres suivis dans les eaux superficielles.



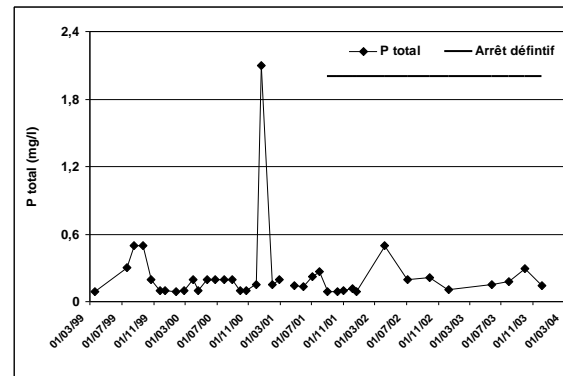
(a) évolution des MES



(b) évolution de NH_4^+



(c) évolution du COD



(d) évolution du phosphore total

Figure 18. Evolution à moyen terme des eaux de surface de l'étang du Rouillard (1999 - 2003)

Depuis que le site ne reçoit plus de matériaux de dragage, une auto-épuration du site se produit. En effet, la plupart des paramètres (NH_4^+ , NO_3^- , Phosphore Total...), dont les concentrations avaient augmenté consécutivement à la mise en dépôt de MD, ont vu leur concentration diminuer significativement (Figure 18). Cependant une comparaison avec les eaux superficielles de la partie non remblayée du site confirme que le remplissage a conduit à une dégradation notable de la qualité des eaux de l'étang du Rouillard. L'Indice Biologique Diatomée (IBD) confirme les tendances tirées du suivi physico-chimique. En dépit de l'amélioration effective de la qualité des eaux superficielles de l'étang du Rouillard, les signes d'une eutrophication restent évidents. Toutefois, depuis la fin du remplissage, il n'a été observé aucun relargage de micropolluants, organiques ou métalliques, des matériaux vers les eaux superficielles. De plus, les matériaux entreposés dans le site du Rouillard ont des caractéristiques comparables à celles des sédiments prélevés lors des campagnes de caractérisation avant dragage.

III.4 Evolution à long terme du Rouillard (2003 - ...)

A partir des résultats obtenus pendant trois ans après la fin des dépôts de matériaux de dragage, il semble hasardeux d'extrapoler à plus long terme sur l'évolution du site du Rouillard et plus particulièrement l'évolution du dépôt. Une nouvelle orientation a donc été prise pour étudier l'influence des microorganismes sur la minéralisation du dépôt. Un regard plus particulier porte sur la solubilisation des éléments métalliques par les microorganismes. En effet, dans les sols et les sédiments, la mobilité et la biodisponibilité des éléments minéraux en général et des éléments métalliques en particulier dépendent prioritairement de leur spéciation chimique (Ross, 1994). Ils peuvent exister en solution sous la forme d'ions libres ou de complexes inorganiques et organiques. Ils peuvent également être associés aux matières particulaires organiques et minérales (adsorption, précipitation, substitution) ou être immobilisés (adsorbés ou même assimilés) par les microorganismes, les végétaux et animaux. La spéciation des éléments métalliques est

principalement affectée par la nature et la réactivité de la matière organique et des surfaces minérales mais aussi par l'activité des microorganismes. L'accumulation des éléments métalliques et les risques de mobilité présentent un danger potentiel lié à la dissolution des métaux eux-mêmes ou des matrices auxquelles ils sont liées comme les oxydes ferriques, dans lesquels ils peuvent se substituer au fer. Leur faible solubilité confère à ces minéraux une grande stabilité. Mais en condition anaérobie (cas des sédiments, des sols riches en matière organique et des sols à hydromorphie variable ou permanente), la mise en place de dissolution réductive peut s'accompagner d'une libération de métaux. Les oxyhydroxydes de Fe(III), Mn(III, IV) mais aussi Co(III) et Ni(III) peuvent ainsi être réduits en leur forme divalente augmentant ainsi leur solubilité. Malgré l'importance de l'activité microbienne dans la solubilisation et la spéciation des métaux, très peu de données sont disponibles pour les sédiments de dragage. Cette partie de notre programme a pour objectif de montrer le rôle des microorganismes autochtones dans la biodégradation de la matière organique et la mobilisation de certains éléments métalliques (Zn, Pb, Co, Cr, Cd, Al, Mn et Fe) contenus dans un sédiment dragué et stocké dans une gravière comme celle du Rouillard. Ce travail est conduit sur des sédiments prélevés en rivière, lors des campagnes de caractérisation pré-dragage de 2002, ainsi que sur des sédiments échantillonnés dans l'étang du Rouillard en 2004.

III.4.1 Potentialité au relargage d'éléments métalliques par les sédiments de rivière

Les expériences, réalisées sur trois sédiments issus des campagnes de caractérisation pré-dragage 2002, dans des réacteurs en batch et en anaérobiose, ont permis d'identifier l'existence de deux populations bactériennes aérobie et anaérobie relativement importantes. La capacité de la population anaérobie à mettre en place un métabolisme carboné (respiration anaérobie et/ou fermentation) a été démontrée. Dans nos conditions expérimentales, les solubilisations du fer et du manganèse sont concomitantes à la minéralisation du glucose, ce qui témoigne d'une association entre activité globale et activité solubilisatrice. Le caractère réduit de ces deux éléments (Fe et Mn) en solution montre que le mécanisme de dissolution mis en place est une réduction enzymatique du fer et du manganèse. Les expériences de spéciation montrent que le fer solubilisé est sous forme ferreuse soulignant que le mécanisme mis en jeu est une réduction bactérienne dissimilatrice du fer. L'analyse minérale de la solution met en évidence une solubilisation également importante de Zn, Co, Ni et Al dans les différents échantillons. L'apport de sources carbonées facilement biodégradables (glucose) démontre l'existence de minéralisation du carbone (mis en évidence par le dosage du CO₂ en infrarouge) dans tous les échantillons. La minéralisation reste cependant significative après la disparition totale du glucose suggérant l'utilisation par les microorganismes autochtones de la matière organique contenue dans les sédiments comme source de carbone. Toutefois, en l'absence initiale de glucose, aucune minéralisation significative n'a été observée dans les sédiments étudiés. Ces expériences ont donc montré que les conditions anaérobioses retenues, qui correspondent à celles de l'interface eau-sédiment dans l'étang du Rouillard, promeuvent une activité microbienne associée à des phénomènes de solubilisation de métaux.

Afin de mettre en évidence le métabolisme carboné mis en place par les microorganismes actifs, une recherche de métabolites carbonés d'une part et le suivi du pH d'autre part ont été entrepris. Les processus observés sont la résultante de l'action de cultures microbiennes mixtes. L'analyse microbiologique a montré l'existence d'une population bactérienne anaérobie relativement importante augmentant en cours de lixiviation. Des bactéries ferri-réductrices ont été quantifiées, isolées et leur action confirmée. L'acidification du milieu, d'une part, et la mise en évidence de la production d'acides organiques (acide acétique et acide butyrique) et d'éthanol d'autre part, montrent que différents processus fermentaires et/ou respiratoires se mettent en place dans le sédiment. Nos résultats ont donc mis en évidence la capacité solubilisatrice des microorganismes autochtones présents dans les sédiments destinés à être dragués et également des phénomènes de précipitation dont l'origine et la signification doivent être définies. Ces résultats ont été présentés sous la forme d'actes d'un colloque international à Venise en 2003 :

« Impact of autochthonous bacteria on solubilisation of metals in dredged contaminated sediments » N. Bousserhine / S. Abbad Andaloussi / G. Varrault / R. Moilleron, 2nd International conference on remediation of contaminated sediments (Venise), octobre 2003. [4]

III.4.2 Potentialité au relargage d'éléments métalliques par les sédiments du Rouillard

Au regard des premiers résultats obtenus sur les sédiments de rivière, nous avons décidé de suivre le comportement des sédiments du Rouillard en présence d'une activité microbiologique stimulée par la présence de glucose. L'approche est donc rigoureusement identique à celle réalisée sur les sédiments prélevés lors des campagnes de caractérisation pré-dragage de 2002. La majorité des résultats observés pour ces sédiments est transposable aux sédiments du Rouillard. En effet, l'activité minéralisatrice a été importante témoignant de la présence d'une population bactérienne très active. La minéralisation du carbone est concomitante à une acidification du milieu. Cette acidification témoigne de la mise en place de processus de fermentation dans le sédiment. Les analyses minérales ont montré des cinétiques de solubilisation similaires pour le fer et le manganèse. La forme réduite de ces deux éléments dans la solution indique la présence de bactéries réductrices. Le cobalt et le chrome montrent des profils de solubilisation similaires à ceux observés pour le fer et le manganèse, témoignant de l'association de ces deux métaux aux oxydes de fer et de manganèse. L'apparition de l'aluminium et du zinc dans la solution est postérieure à celle du fer et du manganèse. Elle se produit parallèlement à la minéralisation de la matière organique du sédiment ce qui indique que l'aluminium et le zinc sont associés à cette phase. Nos résultats confirment que dans des conditions anaérobies telles que celles existant dans les sédiments de dragage, une activité microbienne peut se mettre en place affectant la mobilité de certains éléments métalliques avec des risques de pollution des sols, des solutions du sol et de transfert vers la chaîne alimentaire. Toutefois des aspects restent à explorer. En effet, il serait intéressant d'identifier les microorganismes impliqués et de relier les phénomènes de solubilisation à leurs besoins énergétiques et nutritionnels. Il est aussi intéressant de caractériser le compartiment organique en évaluant sa biodégradabilité surtout qu'il semble réguler la mobilité de certains éléments comme l'aluminium et le zinc. Il serait important d'identifier les formes métalliques en solution pour identifier les transformations qu'elles ont subies ainsi que leur toxicité. De plus, pour stimuler l'activité microbienne un apport de carbone facilement biodégradable (du glucose) a été nécessaire, certains essais conduits dans des milieux d'incubation sans glucose et d'autres avec de l'eau du Rouillard n'ont pas permis de mettre en évidence des solubilisations d'éléments métalliques. Ces premières tendances nécessitent soit de déterminer des conditions plus adaptées à la spécificité du Rouillard, avec le risque de reproduire en laboratoire un clone du Rouillard (!), soit de trouver un juste équilibre entre notre objectif, l'extrapolation à long terme du devenir du site, et la mise en évidence de l'activité microbienne. La difficulté à laquelle nous sommes désormais confrontés est de transposer les résultats obtenus à l'échelle du laboratoire à celle du site dans un contexte d'étude d'impact environnemental.

IV. Bilans sur 6 années de recherche

Depuis 1998, un premier bilan sur ce programme de recherche peut être réalisé (Figure 19). Des collaborations pérennes ont été établies avec les différents acteurs du dragage (VNF, SNS et EMCC) et cette problématique est désormais intégrée dans le programme Piren-Seine. Je suis membre du Comité Technique National sur la Gestion des Sédiments. Dans ce cadre, j'ai participé à l'élaboration de l'ouvrage « Enlèvements des sédiments. Guide méthodologique. Evaluation détaillée des risques liés à la gestion des sédiments et aux opérations de dragage », réalisés par les cabinets d'études URS France et OPHRYS. Une thèse et quatre stages de DEA ont permis de répondre aux interrogations initiales entourant la pratique du dragage sur le bassin de la Seine. En effet la thèse de Sonia Carpentier (2002) a permis de faire le point sur les réglementations nationales et internationales, même si depuis ces réglementations ont évolué avec notamment une nouvelle

circulaire environnementale, en date du 25 juin 2003, intitulée « opération de dragage » émanant de VNF à l'intention des gestionnaires. Les volumes déplacés par le dragage et leur gestion (orientations vers des dépôts à sec ou en eaux) sont désormais connus pour les sédiments prélevés par VNF, un travail prospectif reste toutefois à faire pour les sédiments prélevés par le PAP. Dans ce dernier cas, si le lancement d'études s'est fait de façon conjointe, par le passé, avec VNF désormais le PAP développe seul ses propres études. Les résultats de ces études ne sont pas publics, y compris pour l'évaluation de la qualité des sédiments avant dragage (information recueillie auprès de M Idziorek, responsable des dragages au PAP).

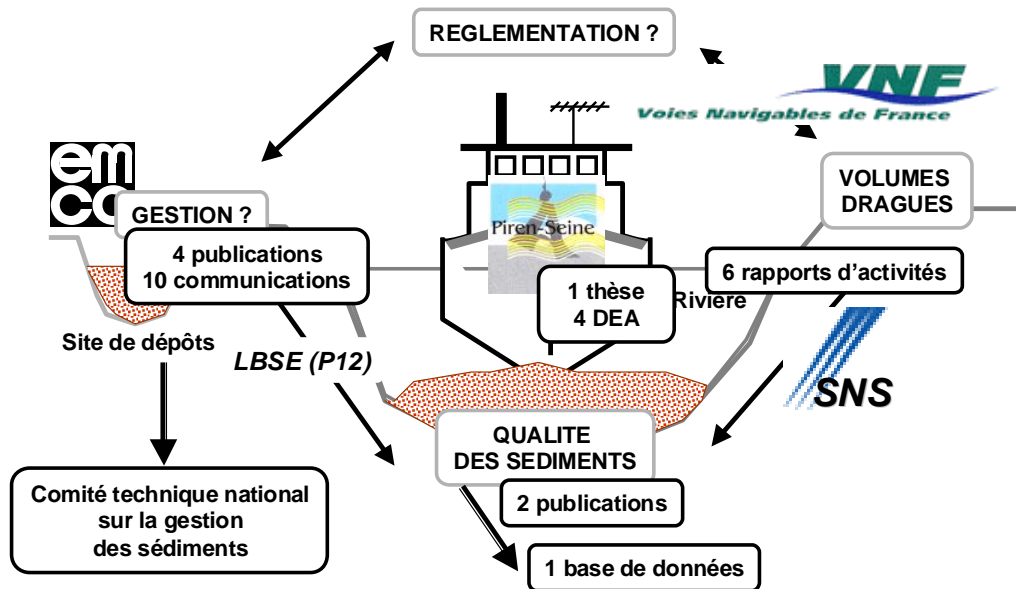


Figure 19. Bilan des programmes de recherche sur la gestion des matériaux de dragage fluvial

Pour l'impact environnemental du stockage des matériaux de dragage dans des sites en eau, il a été montré qu'il était nécessaire de considérer différemment la phase de remplissage de celle de repos du site. Nous avons mis en évidence que la mise en dépôt par voie sèche serait préférable au mode par voie humide, utilisé actuellement, qui consiste à diluer fortement (~ 10 fois) les matériaux avec de l'eau de Seine et de les refouler ensuite vers le site depuis un bateau refouleur. Ceci permettrait de limiter les modifications brutales des conditions physico-chimiques au sein du matériau d'une part, et d'éviter le rejet en Seine des eaux de surface contaminées. Les observations de l'évolution de la qualité des eaux superficielles du site de Rouillard nous confortent dans cette approche, car l'impact majeur de la mise en dépôt de matériaux de dragage a été le relargage de carbone organique et d'ammonium lors du remplissage. Depuis que le site ne subit plus de remplissage, une auto-épuration du site a été observée et les concentrations en NH_4^+ , NO_3^- , Phosphore Total ont diminué significativement. Le cas du COD est différent car sa concentration continue d'augmenter dans la colonne d'eau. Toutefois, les signes d'une eutrophication restent évidents surtout par comparaison avec le côté de l'étang du Rouillard n'ayant pas reçu de matériaux de dragage. Nous n'avons pas observé de relargage de micropolluants depuis le début de l'étude mais cela ne présage pas du devenir du site sur le plus long terme. Pour évaluer ce futur, nous avons établi une collaboration avec le LBSE pour appréhender le rôle des microorganismes à l'interface eau-sédiment et évaluer leur contribution dans la mobilité des éléments métalliques. Des études prospectives ont déjà été réalisées et les premiers résultats doivent être confirmés.

LES MICROPOLLUANTS EN MILIEU URBAIN ANTHROPISE

I. Problématique

Selon l'Organisation des Nations Unies, à l'aube du XXI^{ème} siècle, près de la moitié de la population mondiale vivait en milieu urbain alors qu'au milieu du XX^{ème} siècle seul un tiers y vivait. Les prévisions pour 2030 confirment cette tendance à l'urbanisation de la population puisque 60% de la population mondiale vivra en milieu urbain (Figure 20). Cependant, la surconcentration des activités dans les villes reste surprenante. En effet, la montée en puissance des moyens de transport et de communication aurait dû permettre, en théorie, un étalement géographique des activités et des populations. Si cet étalement s'est bien produit pour certaines activités de production (délocalisations et irruption dans le réseau d'échange mondial des pays à bas salaires), il n'en a pas été de même pour des activités comme la finance, l'assurance, l'immobilier... mais aussi la recherche, le développement et l'innovation scientifique, dépendantes de ressources qui ne sont ni transférables ni interchangeable. Le développement des grandes agglomérations, qui s'est accompagné des hausses du trafic automobile, de la production des déchets ménagers et industriels, des émissions polluantes dans l'atmosphère (industries, automobiles), a eu pour conséquence une augmentation des quantités, d'une part, et une dégradation de la qualité, d'autre part, des Rejets Urbains de Temps de Pluie (RUTP) provoquant des problèmes sanitaires et environnementaux préoccupants pour les pouvoirs publics. Les RUTP, qui sont des déversements n'ayant subi aucun traitement, ont un impact très négatif sur les milieux récepteurs : désoxygénation du milieu due aux apports de matière organique fortement biodégradable, pollution microbiologique liée à l'apport d'agents pathogènes et pollution chimique par les micropolluants organiques, tels que les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, et les micropolluants minéraux tels que les éléments métalliques. Le rôle des réseaux d'assainissement est d'évacuer les eaux usées et les eaux pluviales des centres urbains. Ces réseaux peuvent être séparatifs (eaux usées et pluviales circulant dans des canalisations séparées) ou unitaires (eaux usées et pluviales circulant dans les mêmes canalisations). Dans les réseaux unitaires, comme c'est le cas pour la ville de Paris, les volumes d'effluents transportés par temps de pluie vers les stations d'épuration sont très importants et ne peuvent être totalement traités. Des déversements de RUTP ont alors lieu fréquemment dans le milieu naturel (rivières, lacs, mer).

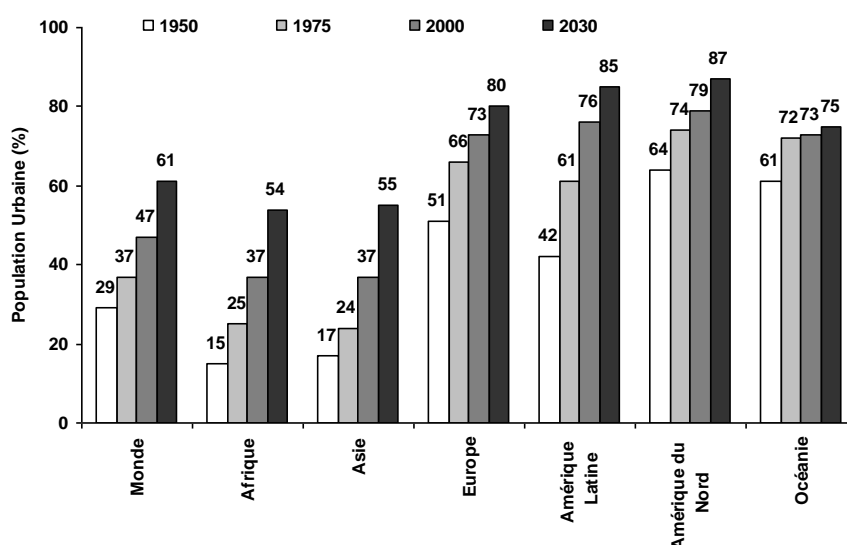


Figure 20. Evolution de la proportion de la population urbaine dans le monde (ONU, 2004)

La maîtrise de cette pollution liée aux RUTP, qu'ils soient strictement pluviaux ou issus de réseaux unitaires, a pris une place croissante dans les problèmes d'assainissement. En effet, ils posent des difficultés vis-à-vis de la gestion et de l'entretien des réseaux d'assainissement (unitaire ou séparatif), du fonctionnement et de la conception des stations d'épuration (STEP), mais également de la qualité de la ressource en eau naturelle destinée à la production d'eau potable, consécutive à la détérioration du milieu récepteur, précédemment évoquée. Malgré cette importance, la connaissance des eaux pluviales urbaines (eaux de pluie, eaux de ruissellement, eaux transitant dans les réseaux d'assainissement par temps sec et par temps de pluie) est restée longtemps limitée en région parisienne. C'est pourquoi, en 1992, l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN), la Ville de Paris, le Comité Inter Agences, le Conseil Régional d'Ile-de-France (CRIF), le Conseil Scientifique et Technique des bassins Versants de Recherche Expérimentaux (CST – BVRE), le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) ont lancé et financé un premier programme de recherche scientifique et technique, entre 1994 et 2000, intitulé « Génération et Transport de la Pollution des Rejets Urbains de Temps de Pluie en Réseau d'Assainissement Unitaire » dont la direction était assurée par Ghassan Chebbo (Cereve). Ce programme s'est déroulé sur le bassin versant urbain expérimental (BVUE) du Marais, situé au centre de Paris, dans les 3^{ème} et 4^{ème} arrondissements (Figure 21). Sur ce bassin versant, drainé par un réseau d'assainissement unitaire, des équipements ont été mis en place afin d'étudier la pollution des eaux pluviales aux différents niveaux du cycle de l'eau (Matières En Suspension, Matières Volatiles en Suspension, Demande Biochimique en Oxygène, Demande Chimique en Oxygène, Cadmium, Cuivre, Plomb, Zinc et hydrocarbures). Les objectifs poursuivis à travers ce travail étaient de trois ordres :

- Evaluer, sur un site unique, la contribution des différentes sources à la pollution globale des eaux de temps de pluie ;
- Caractériser finement la pollution dissoute et particulaire issue de chaque source ;
- Etudier les mécanismes de formation et de transfert de cette pollution en surface et dans le réseau d'assainissement unitaire.

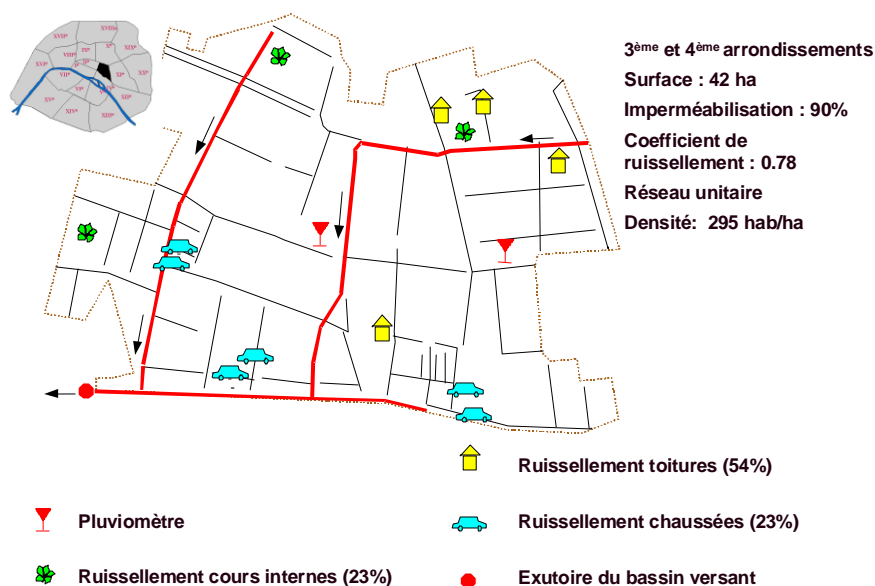


Figure 21. Les équipements du bassin versant urbain expérimental du Marais (1994 - 2000)

Ce type de recherche devait permettre, d'une part, d'orienter des solutions de traitement de la pollution des eaux de temps de pluie, tant curatives que préventives et plus généralement de fournir des éléments pour une politique globale de gestion des eaux pluviales. D'autre part, ces travaux

visaient à fournir les bases pour la conception de modèles de simulation des flux plus précis que ceux disponibles actuellement.

Depuis 2000, et sur la base des résultats obtenus sur le Marais, bassin versant de petite taille (42 hectares), il paraissait important d'étudier les processus dominants sur les surfaces urbaines et dans le réseau d'assainissement, et de disposer de mesures fiables à différentes échelles spatiales afin de cerner l'évolution des caractéristiques et des sources de la pollution des RUTP entre l'amont et l'aval d'un grand bassin versant urbain. C'est dans ce but que le Cereve a intégré le bassin versant du Marais dans une série de 5 à 6 bassins de taille croissante allant jusqu'à Clichy (bassin versant de plusieurs milliers d'hectares) en utilisant en grande partie le réseau de mesure de la ville de Paris et du SIAAP (Figure 22). Ce dispositif expérimental est baptisé OPUR « Observatoire des Polluants Urbains. » La direction de ce programme est assurée par Ghassan Chebbo (Cereve).

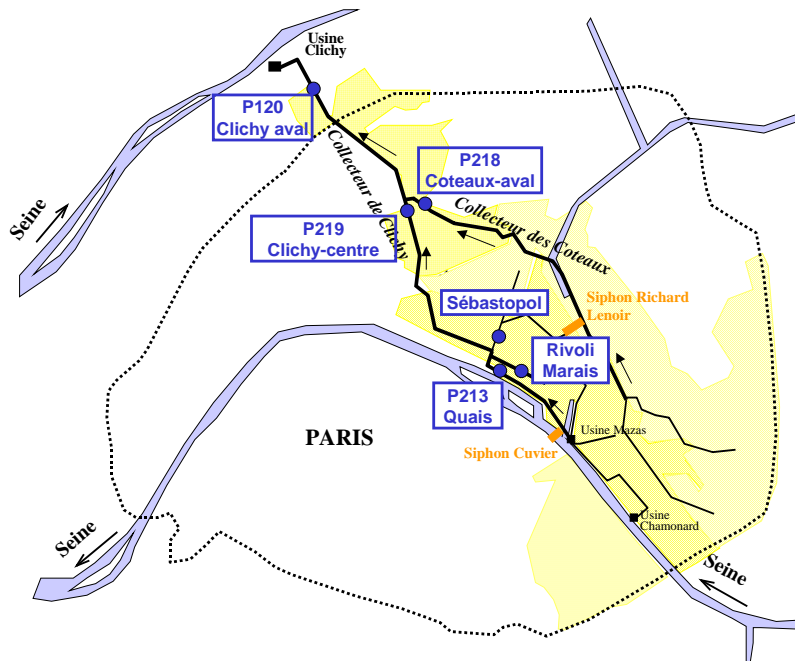


Figure 22. Dispositif expérimental du programme OPUR

L'ambition et l'originalité d'OPUR est de créer, à Paris, un observatoire de terrain, constituant un site d'expérimentation fédérateur pour les différents acteurs de l'assainissement en Ile de France, ainsi qu'un site de référence à l'échelle nationale et internationale. Il vise non seulement un rapprochement de différentes équipes de recherche travaillant dans ce domaine en Ile de France, mais également le développement d'une synergie entre chercheurs et gestionnaires des réseaux d'assainissement. Les problématiques de recherche abordées sur ce site sont définies en concertation entre chercheurs et gestionnaires, de façon à répondre aux besoins opérationnels de ces derniers. Ce site permettra la constitution d'une base de données, riche et fiable, sur les flux polluants en réseau d'assainissement à différentes échelles spatiales. Une telle base de données représente un outil inédit et extrêmement précieux pour faire progresser les connaissances actuelles.

Depuis 1998, mes activités en milieu urbain se sont inscrites dans ces deux programmes de recherche, BVUE du Marais et OPUR, dans lesquels je suis responsable du volet « hydrocarbures. » Mon implication concerne donc principalement l'étude des hydrocarbures, aliphatiques et aromatiques, et plus ponctuellement celle des éléments métalliques, avec pour objectifs :

- L'évaluation des niveaux de contamination dans les différents types d'échantillons que l'on peut rencontrer en milieu urbain ;
- L'étude des distributions en hydrocarbures dans les échantillons pour remonter aux origines de la contamination et essayer de discriminer les contributions des différentes sources ;

- Enfin, la quantification des flux générés à l'échelle de l'agglomération parisienne.

Notre démarche scientifique, résumée dans la Figure 23, comporte trois niveaux d'intervention : celui du réseau d'assainissement (1^{er} cercle), celui du bassin versant (2^{ème} cercle, programme BVUE du Marais) et, enfin, celui de l'agglomération parisienne (3^{ème} cercle, programme OPUR). Ces trois niveaux seront abordés dans les paragraphes suivants, et les principaux résultats présentés.

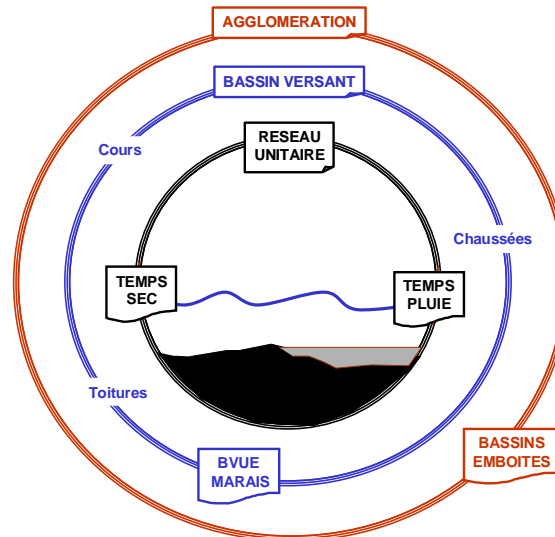


Figure 23. Les différentes échelles spatiales étudiées

II. Etude à l'échelle du réseau d'assainissement

Des flux importants de matière pénètrent, via les différentes voies d'introduction dans le réseau d'assainissement (VIRA). Les VIRA comprennent les eaux usées de temps sec (regroupant les effluents domestiques et industriels), les eaux de lavage des chaussées, et les eaux de ruissellement des surfaces urbaines (toitures, rues, cours, etc.) par temps de pluie. Durant les périodes de temps sec, une partie des particules pénétrant dans le réseau d'assainissement se dépose dans les collecteurs (phénomènes de charriage et décantation) conduisant à la formation des dépôts de réseau. Les récents travaux, focalisés sur les mécanismes de transfert et de stockage de la pollution dans le réseau (Ahyerre, 1999; Oms, 2003), ont considérablement accru notre connaissance de ces dépôts. Ainsi, il a été montré qu'au sein des collecteurs de petites tailles le dépôt très largement majoritaire est minéral (dépôt grossier) ; à l'interface entre celui-ci et la colonne d'eau se dépose, lorsque les conditions hydrauliques le permettent (débit d'eau usée réduit), une couche mince essentiellement constituée de matière organique (couche organique). Le 3^{ème} dépôt minoritaire est le biofilm. Ce dernier est fixé à la paroi des collecteurs au niveau de la ligne de battement des eaux de temps sec (Ahyerre, 1999).

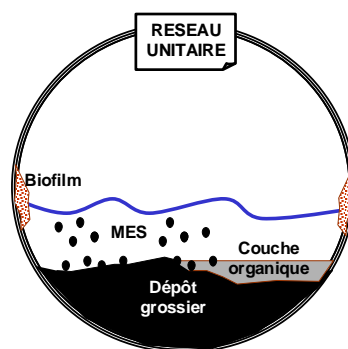


Figure 24. Les différents dépôts en réseau d'assainissement unitaire

Entre 2000 et 2003, ce programme de recherche visant à améliorer les connaissances sur le stockage des hydrocarbures et éléments métalliques au sein du réseau d'assainissement a été subdivisé en deux parties. Une étude approfondie des micropolluants associés aux différents dépôts (dépôt grossier, couche organique, biofilm) et à la colonne d'eau usée (matières en suspension [MES] et phase dissoute) a tout d'abord été menée sur le bassin versant du Marais (Figure 24). Dans un second temps, le champ d'investigation a été élargi à l'ensemble du réseau d'assainissement de la Ville de Paris afin d'estimer la variabilité spatiale de la pollution en hydrocarbures et métaux stockée dans le réseau. Cette étude de la pollution sur l'ensemble du réseau a été réalisée en se focalisant sur le dépôt grossier et a été menée en s'appuyant sur le réseau de bassins de dessablement (BD) du système d'assainissement parisien en collaboration avec la Section d'Assainissement de Paris (SAP). En effet, nous avons utilisé les dépôts présents dans les bassins de dessablement de la Ville de Paris comme indicateurs de la pollution des dépôts grossiers (Rocher, 2003). La multiplicité des sites de collecte ainsi que leur répartition géographique couvrant l'ensemble du réseau apporte, en effet, une vision globale de la pollution stockée dans le dépôt.

Les résultats obtenus lors de la première phase de ce travail sur l'étude des micropolluants associés aux différents dépôts ont été publiés dans deux articles :

« Biofilm in combined sewers: wet weather pollution sources or/and dry weather pollution indicators ? » V. Rocher / S. Azimi / R. Moilleron / G. Chebbo, *Water, Science, and Technology*, **2003** 47(4) : 35-43. [5]

« Hydrocarbons and heavy metals in the different sewer deposits in the "Le Marais" catchment (Paris, France): stocks, distributions and origins » V. Rocher / S. Azimi / R. Moilleron / G. Chebbo, *The Science of Total Environment* **2004** 323(1-3) : 107-122. [6]

Ce dernier article est une synthèse de toutes les informations recueillies sur les hydrocarbures et les éléments métalliques ; elle nous a conduit à tirer des conclusions originales, et permis de conforter des hypothèses déjà émises, sur l'origine des différents dépôts, sur leur dynamique et sur leur rôle dans la pollution de temps de pluie. La Figure 25 donne les teneurs médianes pour les hydrocarbures aliphatiques (somme des *n*-alcanes et de l'UCM) et les HAP obtenus à l'échelle du réseau.

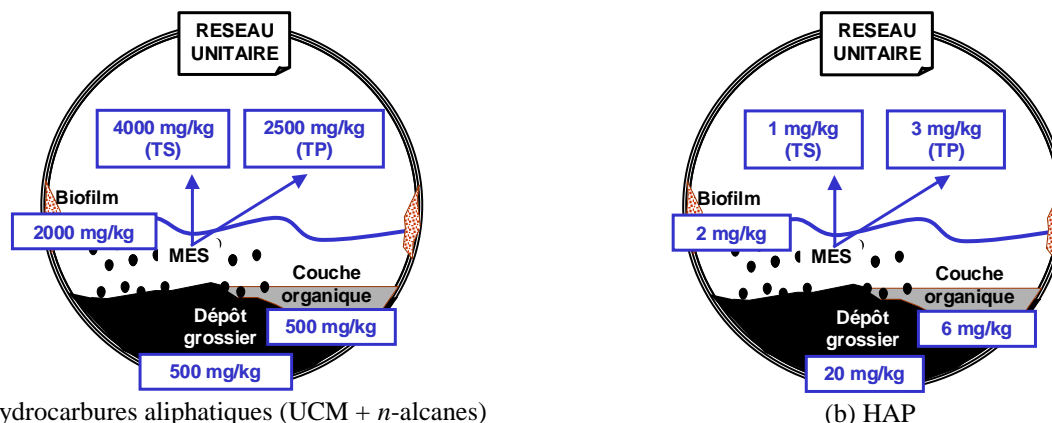


Figure 25. Teneurs médianes en hydrocarbures dans les différents dépôts en réseau d'assainissement unitaire

La deuxième phase, dont l'objet était de généraliser les résultats à l'ensemble du réseau d'assainissement parisien, a donné lieu également à deux publications :

« Pollution métallique associée au dépôt du réseau d'assainissement unitaire parisien » V. Rocher / S. Azimi / S. Garnaud / R. Moilleron / G. Chebbo, *TSM*, **2003** 10 : 75-86. [7]

« Hydrocarbon pollution fixed to combined sewer sediment: a case study in Paris » V. Rocher / S. Garnaud / R. Moilleron / G. Chebbbo, *Chemosphere*, **2004** 54 : 795-804. [8]

En résumé, nous avons montré que les sédiments extraits des BD ont une nature très voisine de celle du dépôt grossier. La teneur en MO du dépôt grossier estimée à 6,7% est, en effet, quasi similaire à celle des sédiments de BD, mesurée à 7,2%. De plus, ces deux types de sédiments présentent des textures granulométriques voisines. Des études antérieures ont montré que les particules de diamètre supérieur à 400 µm représentaient 77 % de la masse totale du dépôt grossier (Ahyerre, 1999) et nous avons montré que les particules de diamètre supérieur à 500 µm représentent 76 % de la masse totale de sédiment. Au regard de ces résultats, nous estimons que le sédiment piégé dans les BD est essentiellement constitué de dépôt grossier en réseau d'assainissement unitaire et donc les niveaux de pollution mesurés dans les sédiments de BD, dont l'échantillonnage est aisé, sont représentatifs de ceux du dépôt grossier. Cependant lors de notre étude sur les dépôts de bassin de dessablement, nous nous sommes interrogés sur la représentativité des échantillons prélevés, car il est apparu que la variabilité spatiale et temporelle des teneurs en polluants, au cœur même des dépôts, est très grande. En étroite collaboration avec la Cellule de Contrôle des Eaux de la Ville de Paris, nous avons examiné, dans le cadre du stage de DEA de Jenny Perez (2004), sa procédure d'échantillonnage. Nous avons ainsi démontré que la procédure actuelle n'est pas appropriée. Un nouveau protocole, qui entrera en vigueur pour la campagne 2005 de caractérisation des dépôts de bassin de dessablement, a été défini :

- Les échantillons seront désormais prélevés avec des carottiers et plus avec des pelles à sédiments ;
- Le nombre d'échantillons (n) ne sera plus systématiquement le même quelque soit le bassin de dessablement, il sera fonction de son volume (V exprimé en m³) : $n = V^{1/2} / 2$;
- Les carottes seront ensuite homogénéisées et un échantillon moyen constitué, sur lequel les paramètres habituellement suivis seront mesurés ; le nombre de répétitions sur l'échantillon moyen est, actuellement, laissé à l'appréciation du gestionnaire.

III. Etude à l'échelle d'un bassin versant : Le Marais

La caractérisation de l'ensemble des dépôts présents dans le réseau d'assainissement nous a permis de comprendre les mécanismes à l'origine des différents dépôts, leur dynamique et leur rôle dans la pollution de temps de pluie. Afin de compléter nos connaissances, un travail a été conduit sur le BVUE du Marais (42 ha), entre 1996 et 2001. Ce programme de recherche visant à améliorer les connaissances sur la génération et le transport de la pollution des RUTP en réseau d'assainissement unitaire a pour objectif de :

- Caractériser les fractions dissoute et particulaire de la pollution des ruissellements urbains (chaussées, toitures, cours) et des eaux usées de temps sec et de temps de pluie à l'exutoire du bassin versant ;
- Evaluer les contributions des différents échantillons d'eaux (ruissellement urbain et eaux usées) et des dépôts du réseau à la pollution globale mesurée à l'exutoire du bassin versant à l'échelle d'un événement pluvieux (Figure 26).

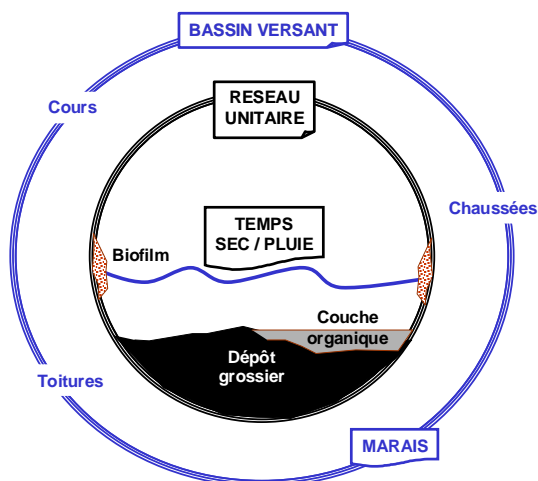


Figure 26. Les différents types de ruissellement urbain étudiés sur le bassin versant du Marais

III.1 Caractérisation de la pollution en hydrocarbures des ruissellements urbains à l'échelle du bassin versant du Marais

La première phase a concerné la caractérisation de la pollution dissoute et particulaire issue de chaque source des micropolluants sur le bassin versant du Marais à savoir les eaux usées de temps sec et de temps de pluie transitant dans le réseau et les eaux de ruissellement des chaussées, toitures et cours, VIRA de temps de pluie. La Figure 21 (page 34) récapitule les équipements dont a été pourvu le bassin versant expérimental du Marais (Gromaire, 1998). Les résultats obtenus sur la caractérisation des différents effluents que nous avons étudiés ont été présentés dans deux publications, l'une relative aux hydrocarbures aliphatiques, l'autre aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) :

« Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban runoff samples from an experimental catchment (Le Marais) in Paris A Gonzalez » / R Moilleron / G. Chebbo / D. R. Thévenot, *Polycyclic Aromatic Compounds*, **2000** 20(1-4) : 1-20. [9]

« Determination of aliphatic hydrocarbons in urban runoff samples from the “Le Marais” experimental catchment in Paris centre » R. Moilleron / A. Gonzalez / G. Chebbo / D. R. Thévenot, *Water Research*, **2002** 36(5) : 1275-1285. [10]

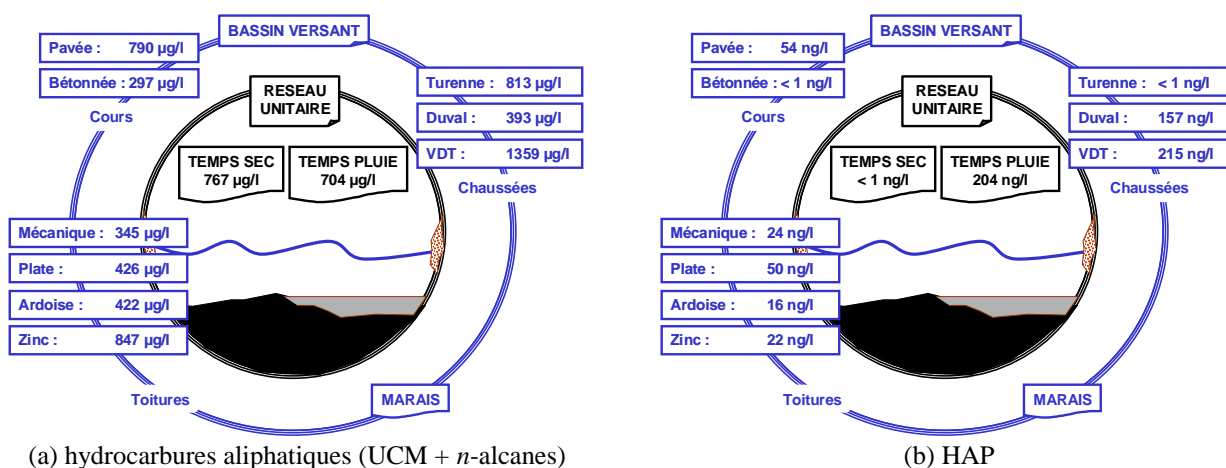


Figure 27. Concentrations médianes en hydrocarbures mesurées sur le BVUE du Marais (1994 - 2000)

La Figure 27 condense les principaux résultats présentés dans ces deux publications sur l'évaluation des concentrations en hydrocarbures dans tous les échantillons analysés lors du programme BVUE du Marais.

III.2 Bilan à l'exutoire du bassin versant du Marais

La seconde étape de notre étude a été l'établissement d'un bilan de la pollution à l'échelle du bassin versant expérimental du Marais pour une dizaine d'évènements pluvieux. Ce travail a donné lieu à une publication (à paraître), qui résume la contribution de tous les types de VIRA de temps de pluie mais également celle des dépôts du réseau à la pollution mesurée à l'exutoire du BVUE du Marais à l'échelle de l'évènement pluvial :

« Contribution of different sources to the hydrocarbon pollution during a rain event at the scale of an experimental catchment in Paris centre » A. Gonzalez / R. Moilleron / G. Chebbo / D. R. Thévenot, *Urban Water* **2004** (sous presse).

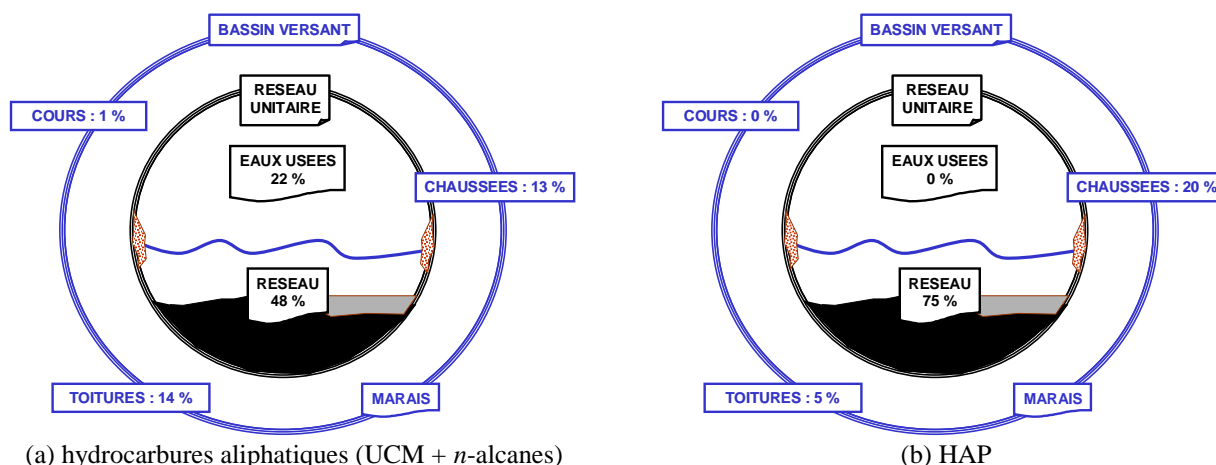


Figure 28. Contributions des différents échantillons (valeurs médianes) à la pollution mesurée à l'exutoire du BVUE du Marais (1994 - 2000)

La Figure 28 synthétise les contributions des différents ruissellements et des dépôts du réseau à la pollution mesurée à l'exutoire du bassin versant du Marais. La contribution du réseau est importante pour les deux familles d'hydrocarbures : 48 % pour les aliphatiques et 75 % pour les HAP. Le ruissellement apporte environ 30 % des hydrocarbures, aliphatiques et HAP, mesurés à l'exutoire. Les eaux usées transitant par temps sec, qui constituent le bruit de fond de la pollution, contribuent à hauteur de 22 % pour les aliphatiques et pratiquement pas pour les HAP. Ces valeurs sont les valeurs médianes établies à partir de 9 évènements pluvieux pour lesquels nous possédons l'ensemble des concentrations et des débits de chacun des affluents.

IV. Etude à l'échelle de l'agglomération parisienne

Les résultats obtenus sur le bassin versant expérimental du Marais, de petite taille (42 hectares), confirment d'une part l'importance de la pollution des eaux de ruissellement (en particulier les chaussées et les toitures), et d'autre part le fait que le réseau d'assainissement n'est pas exclusivement un système de transport mais aussi un réacteur physique, chimique et biologique qui conditionne par ses caractéristiques la qualité des eaux en milieu urbain. Compte tenu de ces résultats, il paraît important d'étudier, dorénavant, les processus dominants sur les surfaces urbaines et dans le réseau d'assainissement, et de disposer de mesures fiables à différentes échelles spatiales afin de cerner la variabilité des caractéristiques et des sources de la pollution des RUTP à l'échelle d'un grand bassin versant urbain. Cette recherche s'appuie sur la mise en place d'un site atelier dans Paris, intégrant le bassin versant du Marais dans une série de 6 bassins de taille croissante allant jusqu'à Clichy (bassin versant de plusieurs milliers d'hectares). Ce dispositif expérimental s'intègre dans le programme OPUR. A ces échelles, comprises entre 40 et 3000 hectares, les thématiques abordées, pour les hydrocarbures, sont :

- La quantification de l'origine de la pollution entre l'atmosphère, le ruissellement sur les différentes surfaces urbaines, les eaux usées de temps sec et les dépôts en réseaux ;
- La quantification de la contribution des différentes activités anthropiques aux flux polluants des eaux urbaines (Figure 29).

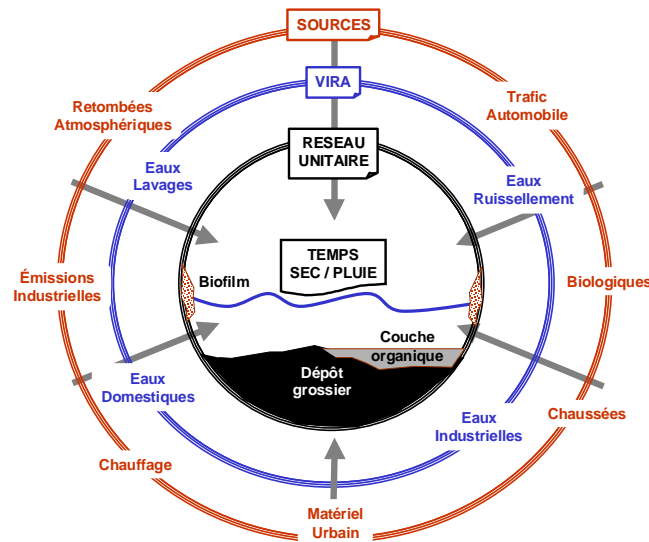


Figure 29. Problématique des origines des micropolluants en réseau d'assainissement

L'analyse de la contribution des apports atmosphériques, en traitant des données issues de trois sites de prélèvement, situés sur un gradient ouest - est (Paris, Créteil, Coulommiers) s'éloignant progressivement de l'agglomération parisienne a fait l'objet d'une publication dans « *The Science of the Total Environment*. » A partir de ces informations, nous avons également évalué la contribution des retombées atmosphériques à la pollution des ruissellements de toitures pour les hydrocarbures et les éléments métalliques afin de déterminer si les contaminations mesurées dépendaient de la nature des toitures. Pour certains éléments métalliques (Cu, Pb, Ti et Zn), il apparaît clairement une relation entre la nature de la toiture et les niveaux relevés, alors que pour les hydrocarbures, le lessivage de l'atmosphère serait la contribution majoritaire à la contamination des eaux de ruissellement. Ces informations ont été publiées dans « *Water, Air and Soil Pollution* » (article à paraître).

« Spatial and temporal variability of trace metals and hydrocarbons in atmospheric deposition: case of the Ile de France area (France) » S. Azimi / V. Rocher / M. Muller / R. Moilleron / D. R. Thévenot, *The Science of Total Environment* **2004** (sous presse). [12]

« Hydrocarbons and metals in atmospheric depositions: comparison with roof runoff » V. Rocher / S. Azimi / J. Gaspery / L. Beuvin / M. Muller / R. Moilleron / G. Chebbo, *Water, Air and Soil Pollution* **2004** (sous presse). [13]

Deux approches différentes ont été exploitées pour caractériser les eaux provenant du lessivage des chaussées. La première, classique, se focalise sur les eaux de lavage des voiries, qui ont été étudiées afin d'évaluer leur contribution aux flux d'hydrocarbures et de métaux mesurés à l'exutoire d'un bassin versant, celui du Marais en l'occurrence. Plusieurs campagnes d'échantillonnages ont été conduites, en 2002 et 2003, sur des rues présentant des caractéristiques différentes au niveau de la circulation automobile et des activités industrielles et artisanales présentes. L'étude de la distribution des hydrocarbures aliphatiques et HAP a mis en évidence que les particules des eaux de lavage des voiries pourraient expliquer pour partie la contamination pétrolière relevée dans la couche organique. Le flux d'hydrocarbures entrant dans le réseau d'assainissement unitaire par

lavage des voiries représente de l'ordre de 1% du flux véhiculé par les eaux usées de temps sec, transitant à l'exutoire du bassin versant, à l'échelle de l'année. La seconde approche, plus originale, a consisté à étudier les sédiments présents dans les bâches de relevage de l'agglomération parisienne et de les considérer comme des traceurs de la pollution véhiculée par le ruissellement de chaussées (et plus spécifiquement l'automobile), tout en restant lucide des limites de cette approche en terme de représentativité des eaux de voiries collectées sous un tunnel. Pour différentes raisons, telles que la localisation même des bâches de relevage, à proximité de grands axes routiers et le temps de séjour des solides dans les ouvrages, il est probable que la composition des sédiments recueillis dans les bâches de relevage des tunnels soit différente de celle des particules transportés dans les eaux de ruissellement de surface. En dépit de cela, les données recueillies nous ont permis de mettre en avant plusieurs points sur la nature de ces sédiments et l'origine de leur contamination. Leur teneur en matière organique, est dépendante de la localisation des bâches de relevage. Pour compléter cette étude sur les bâches de relevage il serait désormais intéressant de caractériser les eaux présentes dans ces ouvrages pour évaluer leur contribution à la pollution du réseau par temps de pluie, en effet la vidange des bâches de relevages se fait directement dans le réseau principal de la Ville de Paris et actuellement il existe peu voire aucune information sur les effets de cette pratique.

V. Bilan sur 6 années de recherche

Depuis maintenant 1998, nos travaux ont contribué à améliorer les connaissances sur le stockage des hydrocarbures et des métaux dans le réseau d'assainissement parisien. Nous avons montré que la majorité des micropolluants (87-98 %) est stockée dans le dépôt grossier, une faible proportion dans la couche organique (2-13 %) et une part négligeable dans le biofilm (< 1 %). Ces informations nous ont permis de conclure sur la très faible contribution du biofilm à la pollution de temps de pluie. L'étude qualitative de la pollution a apporté des éléments importants sur l'origine des contaminations et sur la dynamique des dépôts en réseau. Ainsi, les signatures aliphatiques indiquent une pollution d'origine pétrolière dans le dépôt grossier (huiles et graisses automobiles) et une combinaison des apports biologiques (végétaux, résidus alimentaires) et pétroliers dans la couche organique. Les distributions aromatiques soulignent, quant à elles, l'importance de la contamination pyrolytique (trafic automobile, chauffage résidentiel, etc.) dans l'ensemble des dépôts. Enfin, l'étude des signatures a révélé que la couche organique et le biofilm sont majoritairement constitués des matières en suspension transitant dans les collecteurs et confirmé que leurs temps de résidence dans le réseau d'assainissement sont inférieurs à celui du dépôt grossier. Par ailleurs, les teneurs en métaux fluctuent considérablement sur l'ensemble du réseau et il n'existe pas de signatures métalliques typiques du dépôt de réseau. Une variabilité spatiale des teneurs a également été mise en évidence pour les hydrocarbures mais, contrairement aux métaux, il existe une pollution de fond en HAP qualitativement homogène sur l'ensemble du réseau d'assainissement.

L'étude conduite sur le BVUE du Marais portant sur la caractérisation des eaux de ruissellement des différentes surfaces urbaines (toitures, chaussées, cours), sur une vingtaine d'évènements pluvieux, a montré que les hydrocarbures sont associés majoritairement à la fraction particulaire à 85 et 100 %, respectivement, pour les aliphatiques et les HAP. De surcroît, les résultats font ressortir l'importance du réseau d'assainissement unitaire dans la pollution mesurée à l'exutoire du bassin versant : 75% de la pollution pour les HAP et 48 % pour les hydrocarbures aliphatiques proviennent du réseau lui-même. Le réseau n'est donc pas uniquement un système de transport des effluents mais il constitue un réacteur physico-chimique qui conditionne la qualité des effluents de temps sec et de temps de pluie. En effet, les bilans de masse entrée-sortie démontrent que le réseau d'assainissement est un lieu où se produisent des processus physico-chimiques complexes et rapides. La pluie provoque l'érosion d'une fraction des dépôts constitués durant le temps sec dans les collecteurs. Le réseau contribue ainsi à la pollution globale par les hydrocarbures mesurée à

l'exutoire du bassin versant. Ce travail a donc permis l'évaluation, à l'échelle du bassin versant, de la contribution à la pollution par les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques de trois sources : les eaux usées des temps secs, les eaux de ruissellement et la remise en suspension des dépôts du réseau.

Lors de l'étude sur la caractérisation des voies d'introduction de polluants dans le réseau d'assainissement (VIRA), à savoir les ruissellements de toitures, de chaussées et les apports directs (effluents domestiques, de restauration, etc.), la comparaison de la pollution véhiculée par les eaux de toitures avec celle des retombées atmosphériques a montré que les hydrocarbures proviennent exclusivement du compartiment atmosphérique alors que certains métaux lourds (Cu, Pb, Ti et Zn) sont largement émis par les toitures (couvertures et accessoires). La seconde plus importante VIRA considérée est le ruissellement de chaussées qui comprend le ruissellement de temps de pluie et le lavage de la voirie. La caractérisation des sédiments extraits de stations de relevage, situées le long d'axes routiers majeurs, a permis d'estimer les niveaux de contamination des sédiments de ces ouvrages à 80 et 24 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, pour les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, et à 27800, 1630, 770, 790 et 2,7 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ respectivement pour le Fe, Zn, Pb, Cu et Cd. Notre étude des eaux de lavage a, quant à elle, souligné l'importance des quantités de micropolluants générées par le lavage quotidien de la voirie.

Par ailleurs, des collaborations pérennes se sont développées, lors de ce travail notamment, avec différents services techniques de la ville de Paris (services de l'assainissement et services de la voirie), auprès desquels nous jouons un rôle d'experts.

LES FUTURS PROJETS DE RECHERCHE

Mes projets de recherche pour le futur se déclinent suivant deux axes :

- A court terme, en complétant avec de nouvelles approches les projets dans lesquels je suis déjà impliqué ;
- A moyen terme, avec le développement de nouvelles thématiques dans le domaine urbain.

I. Dans la continuité des programmes actuels

I.1 Impact de la mise en dépôt des matériaux de dragage

Les résultats obtenus, jusqu'à maintenant, sur le suivi de l'étang du Rouillard montrent que les matériaux de dragage déposés se comportent comme un piège pour les éléments métalliques et les micropolluants organiques (Carpentier *et al.*, 2002c). Ils restent donc, en fonction des variations des conditions physico-chimiques du milieu, une source potentielle de polluants métalliques et organiques, comme l'attestent les premières études menées sur l'influence des microorganismes. Ces travaux ont mis en évidence l'action des microorganismes dans la dissolution des phases particulières porteuses du fer (sulfures, carbonates), ce qui abouti à une libération des éléments métalliques. Toutefois, pour mieux comprendre l'influence de modifications des conditions chimiques et physiques à l'interface eau-sédiment, de nouvelles recherches sont prévues notamment dans le cadre de la thèse de Catherine Gounou, dirigée par Jean-Marie Mouchel et Noureddine Bousserhine, qui portera sur la « détermination de la biodisponibilité des éléments métalliques : couplage et comparaison des approches microbiologique et chimique ». Cette thèse, qui débutera en octobre 2004, complétera les travaux microbiologiques développés en 2003. De nombreuses études antérieures, utilisant une approche purement chimique, avaient pour objectif de réaliser la spéciation des éléments métalliques afin d'estimer leur mobilité dans les sols et sédiments. Une approche similaire est menée par les microbiologistes qui cherchent à évaluer la fraction mobile mais en utilisant non plus des agents chimiques mais des microorganismes pour mettre en solution les éléments métalliques. Peu d'études mènent de front une approche biologique, physique et chimique d'une part, tout en cherchant à corrélérer les résultats d'études de laboratoire avec des observations *in situ* de sols ou de sédiments, d'autre part. Cette démarche est pourtant nécessaire pour parvenir à une compréhension des mécanismes de la biogéochimie des éléments métalliques et de leur dynamique dans les sols et sédiments. Notre approche s'articulera autour de trois axes : (i) sélection et caractérisation des microorganismes actifs et représentatifs de sédiments et sols contaminés par des éléments métalliques, (ii) étude du fonctionnement d'un réacteur simplifié « minéral - matière organique - microorganismes » conduisant à la mise en solution des métaux et comparaison avec un réacteur où un agent chimique classique remplacera l'acteur biologique ; cette approche permettra de souligner les différences de pouvoir solubilisant des microorganismes au regard de celui des agents chimiques couramment utilisés et d'en identifier les causes en s'intéressant aux différentes phases, dissoute et particulaire, présentes dans notre réacteur et (iii) suivi de la dynamique des éléments métalliques dans des sols et sédiments situés sur des sites de référence afin de valider les résultats des approches en réacteur.

L'un des principaux facteurs contrôlant l'influence des éléments métalliques dans les processus biologiques et chimiques dans les sédiments est la présence de sulfures (Bussy, 1996; Billon *et al.*, 2002). La stabilité ou la réactivité des sulfures métalliques tient à leur mode de formation. Les sulfures se forment dans des milieux réducteurs anoxiques. Par conséquent, si une modification des conditions d'oxydoréduction venait à se produire, l'oxydation des sulfures métalliques conduirait à

un relargage de métaux biodisponibles représentant un risque écotoxicologique pour la colonne d'eau ou la nappe phréatique de zones de dépôts de matériaux de dragage comme l'écosystème « Rouillard. » Ainsi, pour optimiser le suivi de la qualité des eaux superficielles et interstitielles de l'étang du Rouillard, et évaluer la mobilité des éléments métalliques, l'utilisation de DGT (Diffusive Gradient in Thin films ou gradient de diffusion en couche mince) est envisagée. Cette méthode repose sur le principe de diffusion stationnaire à travers un gel mince, en présence d'une couche de résine fixatrice des cations métalliques présents sous forme dissoute dans l'eau du milieu dans lequel il est placé : eaux superficielles (Torre *et al.*, 2000; Peters *et al.*, 2003) ou eaux interstitielles de sédiments (Zhang *et al.*, 1995; Zhang *et al.*, 2002; Naylor *et al.*, 2004). Notre objectif est d'utiliser ces méthodes *in situ* pour déterminer les concentrations d'éléments métalliques labiles dans la colonne d'eau et pour réaliser des profils de concentration de métaux dans l'eau interstitielle des sédiments de l'étang. Des mesures de la concentration dissoute en éléments métalliques, par ICP-MS (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry), dont les limites de détection sont plus basses que les méthodes utilisées par les laboratoires certifiés retenus dans le cadre du suivi trimestriel débuté en 2001 à la fin du remplissage de l'étang, compléteront ce volet. En effet, les résultats des mesures en ICP-MS sont nécessaires pour valider les mesures DGT avec des mesures sur la phase dissoute. Une étude identique sera conduite sur le site de dépôts plus ancien de Triel, dont le remblaiement s'est achevé en 1998. Les résultats que nous obtiendrons apporteront des informations nouvelles pour la réalisation d'études d'impact de ce mode de stockage des matériaux de dragage.

I.2 Les sources d'hydrocarbures en milieu urbain

A la suite du programme du BVUE du Marais, les eaux de ruissellement ont été identifiées comme une source importante de micropolluants des effluents de temps de pluie : il s'agit maintenant d'identifier plus précisément les activités humaines impliquées. A l'heure actuelle, les connaissances sur les caractéristiques des différents types d'émissions anthropiques et sur la quantification de leurs contributions respectives aux flux polluants véhiculés par les eaux urbaines restent très limitées. Ces connaissances sont cependant déterminantes pour la mise en place de stratégies de réduction à la source des micropolluants urbains, stratégies qui sont préconisées dans la nouvelle directive cadre européenne sur l'eau. Par conséquent, depuis 2000, une base de données sur les sources est en cours d'élaboration : elle est alimentée par les informations sur les concentrations dissoutes, particulières et totales d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques. Le calcul de certains indices améliorent la caractérisation des différents types d'échantillons (Figure 30). La finalisation de cette base de données, sur les sources d'hydrocarbures en milieu urbain, est un axe prioritaire que je souhaite développer au Cereve. La méthodologie retenue doit être adaptable à d'autres sites urbains que celui de la ville de Paris. L'étape suivante concerne donc l'exploitation de cette base de données avec comme but ultime de remonter aux activités humaines contribuant principalement à la pollution en hydrocarbures mesurée à l'exutoire du bassin versant considéré. L'outil statistique le plus approprié pour cette exploitation (ACP, régression linéaire multiple, réseau de neurones ou autre), reste à déterminer. Ce thème de recherche doit être planifié sur plusieurs années car il nécessite la mise en œuvre de tout un panel de dispositifs de collecte et traitement d'échantillon pour tendre, dans la mesure du possible, vers une exhaustivité des sources urbaines.

Un paramètre difficile à évaluer, mais qui est nécessaire à la validation de notre approche, correspond à l'estimation des incertitudes sur les teneurs évaluées et les importances relatives de chacune des sources. Il semble nécessaire de procéder, par étape successive, en réalisant des bilans intermédiaires, à une échelle temps, s'échelonnant entre l'événement pluvieux ou l'année, et en commençant par les flux hydriques (phases aqueuses et particulières) en réseau par exemple. Une fois ce bilan hydrique affiné, un bilan sur les polluants sera établi pour les principales VIRA : eaux usées de temps sec (regroupant les effluents domestiques et industriels), eaux de lavage des

chaussées, et eaux de ruissellement des surfaces urbaines (toitures, rues, cours, etc.) par temps de pluie). Ce type de travail a déjà été conduit sur le bassin versant expérimental du Marais pour les contributions des eaux de ruissellement de temps de pluie (Gromaire, 1998; Garnaud, 1999; Gonzalez, 2001). Si les résultats, sur la zone d'étude du programme OPUR, sont en adéquation avec les niveaux d'incertitudes préalablement évalués alors un bilan, plus précis, des principales sources pourra être envisagé. Pour ce dernier, certaines informations complémentaires sont nécessaires comme un inventaire des activités émettrices et leur caractérisation en terme de flux d'émissions de polluant. Ces informations nécessitent l'établissement d'un SIG sur la zone étudiée et, pour la caractérisation des activités émettrices, l'utilisation de données de la littérature ou de données générées directement sur les sites étudiés. Ce chantier a débuté par l'étude des VIRA de temps sec, comme les eaux usées d'origine domestique, et certains effluents industriels à savoir les eaux provenant de restaurants ou de garages (Rocher, 2003).

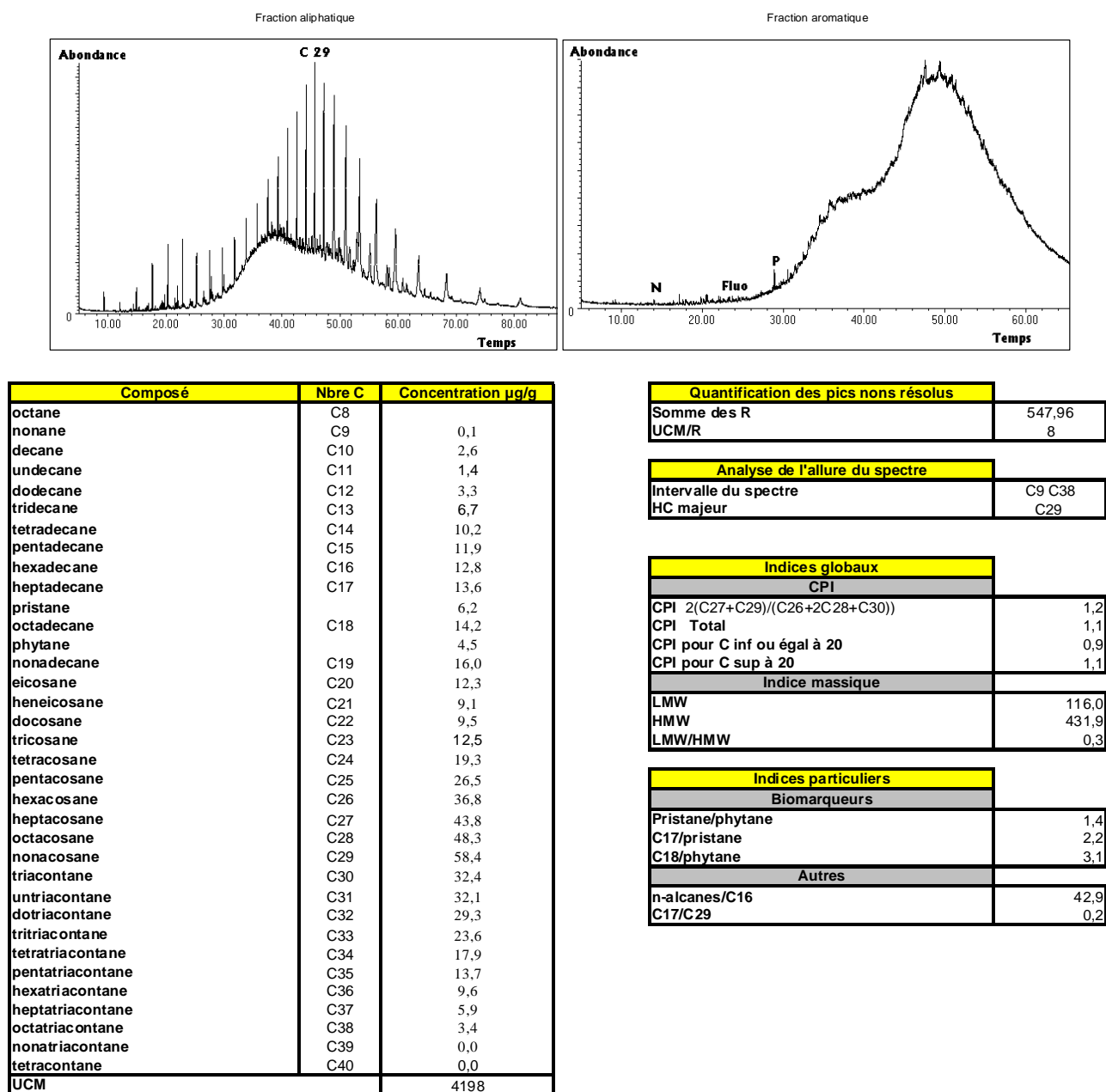


Figure 30. Exemple d'une fiche informatisée de synthèse des données sur les sources d'hydrocarbures aliphatiques : cas d'un pneumatique automobile

Pour confirmer les tendances observées sur le bassin versant du Marais, principalement la forte contribution des dépôts du réseau à la pollution mesurée à l'exutoire, l'étude des caractéristiques

des eaux usées de temps sec et de temps de pluie à différentes échelles spatiales se poursuit dans le cadre de la thèse de Johnny Gasperi, débutée en octobre 2003. Elle s'appuie sur le dispositif expérimental d'OPUR. Comme les particules en suspension sont le vecteur principal de la pollution des RUTP (Chebbo, 1992; Gromaire, 1998), pour optimiser la conception, le dimensionnement et la gestion des ouvrages de traitement par décantation, qui constitue un moyen efficace de traitement (Chebbo, 1992), la connaissance des vitesses de chute des particules en suspension et les charges polluantes par classes de vitesses de chute constituent des éléments essentiels aux maîtres d'ouvrage (Chebbo *et al.*, 2003). Généralement les études sur les vitesses de chute s'attachent à la répartition en masse des MES par classe de vitesse de chute. Il est alors possible d'évaluer l'efficacité des ouvrages de décantation mais l'information relative à l'abattement des différents polluants associés à ces particules n'est pas directement accessible. Or, comme la répartition par classe de vitesses de chute est susceptible d'évoluer d'un polluant à l'autre, il est nécessaire d'accéder à cette information pour évaluer l'efficacité des ouvrages de traitement par décantation. Dans le cadre de la thèse de Johnny Gasperi, la répartition des HAP par classe de vitesses de chute sera abordée à l'aide du dispositif expérimental de mesure VICPOL (Vitesse de CHute des POLLuants). Une attention particulière sera portée à l'adaptation de ce protocole au cas particulier des HAP, pour lequel le facteur limitant des analyses est la masse de particules récupérées par classe de vitesse, car en fonction de leur niveau de contamination, le produit masse x teneur doit être supérieur à notre limite de quantification, variable d'un HAP à l'autre, qui est actuellement de l'ordre de 0,5 ng (soit 250 µg/kg.ms pour une masse extraite de 100 mg de matières sèches ramenée à un volume final de 50 µl de solvant organique). Ainsi, ces résultats contribueront à optimiser l'efficacité des ouvrages de décantation en fonction des molécules polluantes qui doivent être éliminées.

I.3 SequaPOP ?

A l'instar des bassins fortement anthropisés, le bassin de la Seine est soumis à différentes sources de contaminations en métaux et micropolluants organiques : industries, grandes villes mais aussi retombées atmosphériques, sources agricoles diffuses, etc. Depuis 1989, le Piren-Seine a graduellement développé une série d'études sur la contamination métallique, ses origines et ses processus de transport et évolution dans la pluie, les effluents urbains, les principales rivières, leurs sédiments et quelques organismes aquatiques. Le Piren-Seine a également développé des études hydrologiques et sédimentaires permettant d'établir des flux de matières en suspension et donc d'accéder à des bilans annuels de transfert de métaux fixés sur les particules. Ces travaux visent à compléter les connaissances issues des surveillances régulières développées dans les années 80 par le RNB (sur les sédiments), le SNS (MES), et le SIAAP (boues collectées dans les stations d'épuration des eaux usées). D'autres sources d'informations ont également été considérées à savoir les banques de données de l'AESN et des DRIRE sur les rejets domestiques et industriels. Partant du constat qu'il n'existait aucune centralisation de ces informations, le Piren-Seine a développé un outil dénommé SequaMet, piloté par Michel Meybeck (UMR Sisyphe, Paris VI), dont la conception a nécessité un travail de synthèse sur les différentes sources de contamination. La contamination est appréciée dans SequaMet à différentes échelles spatiales qui doivent permettre d'établir des comparaisons entre les différentes matrices étudiées (sédiments, MES, laisses de crues, MES piégées par des trappes...). SequaMet se présente actuellement comme une base de données géoréférencée dont les objectifs principaux sont :

- Une cartographie des fonds géochimiques des particules (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn...) sur tout le bassin hydrologique,
- Un inventaire des sources de contamination,
- Une évaluation des niveaux de contamination des particules et des flux moyens,

- Une présentation de l'évolution temporelle et de la répartition spatiale de la contamination métallique particulière sur la période 1983-2003.

Le Cereve contribue au développement de la base de données de SequaMet notamment en fournissant des informations sur les teneurs métalliques mesurées dans les retombées atmosphériques (Azimi, 2004) et sur l'impact des RUTP à travers les teneurs mesurées sur les MES piégées dans des trappes à sédiment et dans les sédiments superficiels en période estivale (Estèbe, 1996; Estèbe *et al.*, 1997).

Sur le principe de SequaMet, et dans l'optique des préconisations de la nouvelle directive cadre sur l'eau, qui demande la réalisation d'un état des lieux et le suivi de son évolution temporelle, le Piren-Seine souhaite mettre en place un « système d'évaluation de la contamination par les polluants organiques persistants (SequaPOP) ». Il a décidé de décomposer SequaPOP en plusieurs sous-systèmes experts en tenant compte de la diversité des familles de micropolluants organiques rencontrés dans l'environnement : HAP, PCB, organochlorés et phtalates. La mise en place de SequaPop se décompose en deux phases :

- Un inventaire des données disponibles à l'échelle du bassin versant de la Seine : le recensement complet des producteurs de données (institutionnels et équipes de recherche du Piren-Seine) vise à dresser le panorama de l'ampleur des connaissances sur la contamination en POP ;
- Une phase d'analyse et de diagnostic de l'existant : cette étape vise à mettre en évidence les points forts et les carences de la surveillance actuelle dans le domaine des POP ; à l'issue de cette phase, seules les données validées seront intégrées dans la base de données.

Pour les HAP, sous-système dans lequel je suis particulièrement impliqué, la mise en place de SequaPOP répondra à plusieurs attentes sur la réalisation de bilans de transferts à l'échelle du bassin de la Seine et l'estimation des sources des contaminations. En effet, en plus de la centralisation et de la spatialisation des données, un objectif de SequaPOP est une évaluation, fiable, des niveaux de contamination des MES pour évaluer les flux de HAP à l'échelle du bassin de la Seine. Comme la grande majorité des HAP est présente dans les eaux sous forme particulière (Fernandes *et al.*, 1997), la connaissance des teneurs en HAP présents dans les MES permettra d'accéder à une estimation correcte des flux suivant l'expression :

$$\Phi_{\text{HAP}} = f \times Q \times [\text{MES}] \times [\text{HAP}]_{\text{MES}}$$

Avec Φ_{HAP} le flux annuel en HAP (kg/an), Q le débit annuel de la rivière (Tm^3/an), [MES] la concentration moyenne, pondérée par les débits instantanés, en MES dans le fleuve (mg/l) et $[\text{HAP}]_{\text{MES}}$ la teneur moyenne, pondérée par les débits instantanés, en HAP dans les MES (mg/kg) ; f est un facteur correctif pour aboutir à l'unité désirée pour le flux annuel en HAP Φ_{HAP} .

Ces flux permettront d'évaluer la contamination de fond en HAP dans le bassin de la Seine en étudiant des stations très à l'amont du bassin et d'apprécier l'impact des activités anthropiques (plus particulièrement l'agglomération parisienne) sur la pollution en HAP dans la Seine par une comparaison entre des stations situées à l'amont et l'aval de Paris, par exemple. Il faut toutefois rappeler que l'échantillonnage des MES est complexe et difficile à mettre en œuvre, en particulier si l'on souhaite disposer de masses suffisantes pour les extractions et analyses des HAP (environ de 1 à 5 g de matières sèches). Ainsi, depuis 1994, Michel Meybeck a développé, une approche originale pour évaluer les flux de métaux transportés par les différents cours d'eau du bassin de la Seine en utilisant les laisses de crues fraîchement déposées comme indicateurs de la contamination métallique dans les MES représentatives des flux moyens annuels (De Marsily *et al.*, 1998; Horowitz *et al.*, 1999). Ces dépôts s'effectuent sur les plaines alluviales, les plans inclinés et escaliers descendant à la rivière, aux périodes des plus hautes eaux qui sont aussi les plus turbides. Des travaux récents de Gocht *et al.* (2001), sur la comparaison des distributions et des teneurs en HAP dans des MES, des sédiments et des laisses de crues du Rhin, montrent que les laisses de crues

pourraient être aussi utilisées pour les HAP comme indicateur de la contamination moyenne annuelle des MES. Aucune investigation de ce type n'a été réalisée pour les HAP dans le bassin de la Seine. Le Cereve a réalisé une étude préliminaire sur dix échantillons de laisses de crues prélevés durant l'hiver 2000 (Moilleron, résultats non publiés), ceci nécessite d'être complété par l'analyse d'autres échantillons collectés par Michel Meybeck. En comparant les teneurs et les distributions des hydrocarbures dans les MES et les laisses de crues, nous serons en mesure de conclure sur la représentativité de ces dernières et de la possibilité de les substituer aux séries de MES dans l'évaluation des flux. Les teneurs en HAP dans les MES, considérées comme notre référence, proviendront des données recensées dans le cadre de SequaPOP auprès des différentes équipes de recherche du Piren-Seine (Cereve, LHE-EPHE, QHAN, etc.) et des partenaires institutionnels (RNB, SIAAP et VNF entre autre). Ce travail, s'il valide l'utilisation des laisses de crues comme indicateur de la contamination en HAP des MES, conduira à un suivi récurrent sur dix stations à l'échelle du bassin de la Seine. Une évolution inter annuelle pourra également devenir disponible en analysant ou exploitant plusieurs séries d'échantillons. De plus, les comparaisons entre des stations situées à l'amont et à l'aval de Paris permettront de mettre en évidence l'impact de l'agglomération parisienne sur la contamination en HAP de la Seine. Pour la majorité des études recensées dans le cadre de SequaPOP, la teneur globale en HAP résulte de la somme des 16 HAP de la liste prioritaire de l'Agence de Protection de l'Environnement des Etats-Unis. La distribution relative des HAP permettra d'établir une cartographie de la signature des HAP à l'échelle du bassin de la Seine. Cette information, couplée au calcul d'indices indicateurs de sources (Yunker *et al.*, 2002; Wang & Fingas, 2003; Yunker & Macdonald, 2003) devrait nous permettre d'avoir une vision de la répartition des principales sources émettrices sur le bassin de la Seine et de les relier aux activités industrielles, d'évaluer la contribution des retombées atmosphériques, etc. Tous ces travaux seront conduits dans le cadre du Piren-Seine en collaborations avec l'équipe de Marc Chevreuil (LHE-EPHE, UMR Sisyphe, Paris VI).

La phase de recensement des données disponibles auprès des différentes équipes de recherche du Piren-Seine (Cereve, LHE-EPHE, QHAN, etc.) et des partenaires institutionnels (RNB, SIAAP et VNF, etc.) est en cours de réalisation. A titre d'exemple, le Cereve alimente cette base de données en intégrant les résultats qu'il a obtenus lors du suivi des HAP mesurés :

- Sur les MES piégées dans des trappes à sédiment en période estivale (Estèbe *et al.*, 1997) ;
- Sur les laisses de crues échantillonnées en 2000 par Michel Meybeck ;
- Lors des campagnes de caractérisation de la qualité des sédiments avant dragage de 1999 à 2003 (Carpentier *et al.*, 2002b) ;
- Lors des études réalisées sur la biodisponibilité des HAP (Gourlay *et al.*, 2002), et la mesure des HAP dissous par SPE (Solid Phase Extraction) et SPMD (Semi Permeable Membrane Device).

Un premier constat, obtenu lors de ce recensement et analyse des données, est qu'il n'existe pas de suivi récurrent et fiable des HAP. Le principal problème réside, pour les données RNB par exemple, dans l'absence de cohérence, d'un laboratoire certifié à l'autre (ces derniers changeant au gré des marchés), sur les limites de détection et de quantification (ce qui peut être compris) mais également, et surtout, sur le nombre et la nature des molécules mesurées (ce qui est plus difficilement acceptable). Ces deux points rendent ardue une comparaison entre toutes les stations de mesure. Par ailleurs, en fonction de la matrice, la réglementation n'impose pas une mesure systématique des mêmes molécules : six pour les eaux, trois pour les boues de STEP... Ainsi, au-delà des objectifs de recherche et synthèse des résultats, SequaPop pourra conduire à des améliorations des systèmes actuels de collecte d'échantillons et d'analyse des HAP en proposant, sur des bases scientifiques, une harmonisation :

- Des techniques d'analyse (faut-il travailler sur les teneurs totales ou faire la distinction dissous-particulaire pour les échantillons d'eaux, par exemple ?) ;
- Des molécules recherchées (s'orienter vers une recherche systématique des seuls 16 HAP de la liste prioritaire ou intégrer leurs dérivés alkylés plus informatifs sur la détermination des origines), quitte à se démarquer des textes réglementaires.

Cette étape vise à identifier les mesures à adopter afin de constituer un outil complet et fiable de suivi des polluants organiques persistants à l'échelle du bassin de la Seine. Ce travail pourrait être une expérience pilote adaptable à l'échelle nationale sur les autres grands bassins hydrographiques, dans l'optique des préconisations de la nouvelle directive cadre sur l'eau, sur la réalisation d'un état des lieux de la qualité écologique des plans d'eau, d'ici 2015, et de s'associer à ce qui a été développé par le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable sur le bilan diagnostique des réseaux de données sur l'eau².

II. Les graisses en réseau d'assainissement

II.1 Etat des lieux

Depuis le début des années 90, le Cereve travaille à l'amélioration des connaissances sur les réseaux d'assainissement à travers plusieurs programmes pluriannuels de recherche, dont les programmes BVUE du Marais (1994-2000) et OPUR (débuté en 2000) précédemment évoqués. Dans le cadre de ces deux programmes, les polluants étudiés, choisis en fonction des principaux impacts des RUTP sur les milieux récepteurs, sont :

- Les MES, important vecteur de pollution des eaux pluviales ;
- La matière organique, avec notamment les mesures de la DCO et de la DBO₅, qui est responsable des problèmes de désoxygénation du milieu récepteur ;
- Des micropolluants minéraux, tels que les éléments métalliques, et organiques, comme les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques.

Toutefois, les eaux usées transitant dans les réseaux d'assainissement véhiculent également d'autres polluants parmi lesquels les substances dites « émergentes » comme les produits pharmaceutiques, les organoétains, les esters de phtalates et les alkylphénols. Présentes dans les effluents industriels et municipaux, ces substances sont susceptibles de perturber le système endocrinien ou de provoquer des anomalies morphologiques et une réduction du taux de reproduction chez les organismes aquatiques (Levi, 1999). De la même façon, les eaux usées provenant de l'activité urbaine et industrielle transportent des quantités importantes de matières grasses, essentiellement d'origine animale ou végétale (Canler, 2001), peu miscibles à l'eau (Quéméneur & Marty, 1994; Marty *et al.*, 1996; Lefebvre *et al.*, 1998).

Dans les réseaux d'assainissement, les graisses constituent un problème majeur pour les maîtres d'ouvrage des systèmes d'assainissement, car elles se déposent et s'accumulent. Ces perturbations sont de nature hydraulique : rejetées chaudes sous forme liquide, les graisses refroidissent à l'intérieur du réseau et se solidifient. Cette solidification, associée à leur caractère insoluble, provoque le colmatage de canalisations au cœur du réseau d'assainissement, plus spécifiquement dans les branchements des particuliers. Leur présence augmente les contraintes d'exploitation en raison de phénomènes d'encrassement fréquents dus à la formation de tapis graisseux difficiles à désagréger. De plus, les graisses sont aussi responsables de nuisances olfactives en raison de leur caractère fermentescible. La formation de sulfure d'hydrogène (H₂S) est un problème secondaire, grave, également généré par les graisses : dans certaines conditions, elles vont créer une anaérobiose, qui va favoriser la croissance de bactéries intervenant dans le cycle du soufre (Hvitved-

² Site web sur le « Bilan diagnostique des réseaux de données sur l'eau » : <http://www.sce.fr/bde/medd.htm>

Jacobsen *et al.*, 2000; Tanaka *et al.*, 2000; Tanaka & Hvitved-Jacobsen, 2001). Par ailleurs, le sulfure d'hydrogène au contact de l'oxygène de l'air se transforme en acide sulfurique (H_2SO_4) très dommageable à la résistance des collecteurs en béton. Mais c'est au niveau des stations d'épuration que les graisses posent le plus de problèmes. Elles contribuent à réduire l'efficacité de l'aération des effluents à traiter, à détériorer les pompes, à favoriser le développement d'organismes filamenteux fragilisant le fonctionnement de la station (Lefebvre *et al.*, 1998; Canler, 2001). Les stations d'épuration mettant en œuvre des procédés biologiques (boues activées, cultures fixées) sont très sensibles à la variabilité des rejets en quantité et en qualité. Il existe également un risque majeur pour le milieu naturel lors des événements pluvieux, car les graisses présentes dans les eaux usées, véhiculées par les RUTP, sont introduites dans le milieu récepteur et augmentent les risques de désoxygénation et peuvent participer au développement important de certaines algues filamenteuses.

II.2 Les sources d'interrogation

Pour mieux appréhender la dynamique des graisses en réseaux d'assainissement, deux philosophies me semblent possibles :

- La première concernerait la limitation de la production de graisses : il s'agit d'une approche très à l'amont du réseau d'assainissement pour réduire l'impact sur les milieux récepteurs ;
- La seconde serait relative à une meilleure compréhension des phénomènes physiques, chimiques, biologiques régissant la transformation des graisses, une fois introduites en réseaux d'assainissement, pour réduire le colmatage des canalisations, et les problèmes de fermentation.

La première approche envisagée, sur **la limitation de production des graisses**, nécessite des investigations sur les points suivants :

- **Les origines des graisses.** Lorsque l'origine des graisses est abordée, l'accent est naturellement mis sur les activités de restauration et sur le secteur agroalimentaire en général. Avec 2,44 millions de tonnes par an, les déchets de la restauration commerciale et collective (1,1 Mt d'eaux grasses, 1 Mt d'emballages, 65 000 t d'huiles alimentaires usagées et 275 000 t de résidus de bacs à graisse) représentent près de 10% du poids des déchets ménagers selon l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (Ademe). Ces informations confirment les chiffres habituellement évoqués. En effet, au niveau national, le gisement annuel de graisses en provenance de la restauration serait de $230\ 000 \pm 90\ 000$ tonnes (Canler, 2001). En Ile-de-France de 70 000 à 80 000 tonnes de déchets graisseux sont collectés alors que le gisement, estimé, est de 150 000 tonnes/an. Cependant il subsiste une interrogation sur la contribution des activités domestiques au gisement global des graisses dans les réseaux d'assainissement. La maîtrise des apports de la restauration permettrait-elle d'éradiquer les nuisances des graisses en réseau d'assainissement ? Un bilan sur la contribution réelle des eaux usées domestiques aux flux de graisses introduits dans le réseau d'assainissement fournirait des éléments de réponse.
- **La caractérisation des graisses.** Les graisses ou déchets graisseux font référence à deux familles de composés chimiques différentes : les lipides et les acides gras (Canler, 2001). Les lipides constituent une classe de molécules biologiques hydrophobes (graisses ou huiles solubles dans les solvants organiques), constituées d'esters d'acides gras à chaînes moyennes (≥ 10 C), longues ou très longues (≥ 20 C). Les acides gras sont constitués d'une chaîne d'atomes de carbone comprenant, à chaque extrémité, un groupement méthyle ($-CH_3$) et un groupement carboxyle ($-COOH$). Actuellement, dans une optique réglementaire, et non de caractérisation, les graisses sont estimées par trois techniques différentes, dont aucune n'est spécifique des acides gras, qui conduisent à un indice global en graisses : l'indice CH_2 , le SEC (substances extractibles au chloroforme), le MEH (matières extractibles à l'hexane). Pour évaluer les gisements, ces techniques peuvent être appropriées. La distinction entre les apports domestiques

et les apports de la restauration, avec l'identification de traceurs spécifiques, nécessite, pour sa part, de développer des techniques chromatographiques, qui offrent l'opportunité de différencier les lipides, les acides gras et les stérols (Quéméneur & Marty, 1994; Yamashiro *et al.*, 1999; Peng *et al.*, 2002; Carreira *et al.*, 2004). En développant une approche similaire à celle que nous avons développée avec les hydrocarbures, les signatures caractéristiques des deux effluents pourront être établies. Ensuite sur des échantillons en réseau et en entrée de stations d'épuration, il serait possible de déterminer l'origine des graisses.

- **Les filières d'élimination et de valorisation des déchets contenant des graisses.** Parallèlement à l'évaluation des gisements en graisses de la restauration et des activités domestiques, une étude sur l'efficacité des bacs à graisses doit être développée. En effet, il semblerait que les apports en graisses soient directement liés à un dysfonctionnement dans la filière de traitement des graisses, en amont du réseau, dans les restaurants. Plusieurs raisons sont évoquées : efficacité réduite des procédés (schématiquement deux types : procédés physiques et biologiques), mauvaise gestion des bacs à graisses par les professionnels, en terme d'entretien et de vidange, etc. Ces différents points nécessitent d'être éclaircis au travers d'enquête auprès des professionnels pour mieux appréhender les problèmes de « gestion » des bacs à graisses, mais aussi en développant des études sur l'efficacité des différents procédés actuellement sur le marché. Un autre aspect contribue au mauvais fonctionnement de la filière « graisses » en France, selon l'Ademe, la valorisation limitée des déchets de la restauration.

Pour répondre à l'ensemble de ces questions, une étude pilote devrait être conduite sur un bassin versant, dont les caractéristiques, densité de population, activités industrielles, plus spécifiquement celles relatives à la restauration, et la configuration hydraulique sont parfaitement connues. Ce bassin devrait également comporter des zones résidentielles pour évaluer les teneurs en graisses dans les eaux domestiques. A partir de ces informations, des bilans seront réalisés à l'échelle de la journée et/ou de l'année sur le bassin versant. Une extrapolation au niveau national des gisements domestique/restauration pourrait s'appuyer sur ces résultats. L'aboutissement des études sur la caractérisation et la nature de graisses permettra de relier les gisements aux activités émettrices. La seconde approche sur la dynamique en réseau d'assainissement pourra être développée, à la fois, sur le bassin versant retenu et en laboratoire pour mieux cerner l'influence des phénomènes responsables de l'évolution des graisses en réseau. Un tel programme de recherche doit se développer en associant le Cereve à l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et l'Ademe, qui participent déjà à des études, ponctuelles, sur cette thématique. Il est envisagé de déposer une demande de co-financement d'une thèse auprès de l'Ademe, dans la thématique « déchets », des discussions sont en cours avec la ville de Paris pour compléter le financement de cette thèse.

RESPONSABILITES DE CONTRATS DE RECHERCHE

Dès 1999, j'ai obtenu une autonomie financière concernant les deux principales thématiques de recherche dans lesquelles je me suis investi depuis mon arrivée au CEREVE. Un détail des crédits gérés, réparti entre les différentes sources de financements (programmes Piren-Seine et OPUR et organismes de tutelles : Université Paris XII-Val de Marne et l'École Nationale des Ponts et Chaussées) est présenté Figure 31.

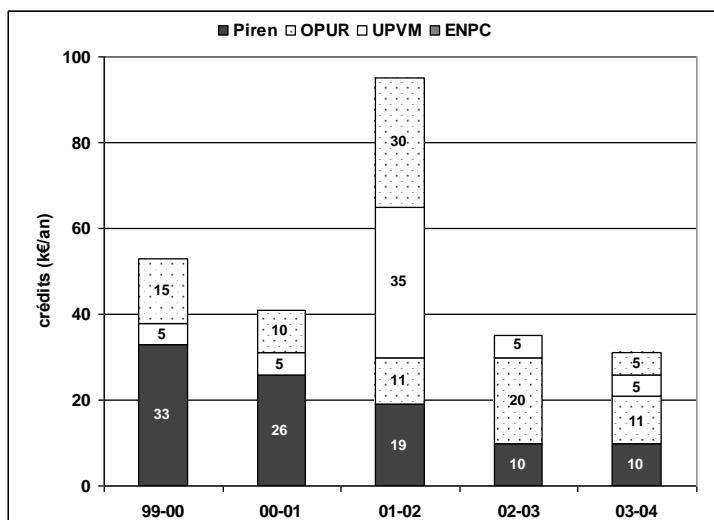


Figure 31. Répartition des crédits annuels (en k€/an) de recherche obtenus depuis 1999

Ces crédits ont été complétés, d'une part, par les dotations du Ministère de la Jeunesse, de l'Éducation et de la Recherche (à hauteur de 5k€/an), et d'autre part, par celles du Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer, via l'ENPC. Ces dernières sont variables d'une année sur l'autre, car elle participe essentiellement aux frais d'investissements. Ainsi, depuis mon arrivée au Cereve, j'ai participé à l'acquisition d'une chromatographie ionique avec passeur automatique, d'un système d'extraction micro-ondes de type Soxwave® pour l'analyse des hydrocarbures sur matrices solides, d'un passeur automatique pour l'appareil de chromatographie gazeuse couplé à la spectrométrie de masse (CG-MS). J'ai également participé au renouvellement de l'absorption atomique du laboratoire avec l'acquisition d'un Spectromètre d'Émission Atomique avec Source Plasma à Couplage Inductif (ICP-AES) en 2002. Cette acquisition s'est accompagnée d'une restructuration de la salle blanche du Cereve, avec notamment sa climatisation. La totalité de cette opération, représentant un investissement de 100 k€, a été financièrement soutenue par l'attribution d'un « Bonus Qualité Recherche » de l'Université Paris XII-Val de Marne, d'une dotation d'équipement de l'École Nationale des Ponts et Chaussées pour les deux tiers, le complément provenant des contrats de recherche. Par ailleurs, ces crédits annuels ont permis de conduire ces deux programmes de recherche en termes d'équipement, de fonctionnement, dont les contrats de maintenance, de salaires et de missions (Figure 32).

Les différentes thèses, que j'ai co-encadrées, ont été financées sous forme de bourses : allocations du Ministère de la Jeunesse, de l'Éducation et de la Recherche pour Sonia Carpentier et Vincent Rocher, et bourse du Consejo Nacional de Ciencia y Tecnologia (CONACYT), organisme mexicain, pour Ana Gonzalez. La thèse actuelle de Johnny Gasperi est financée par une bourse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

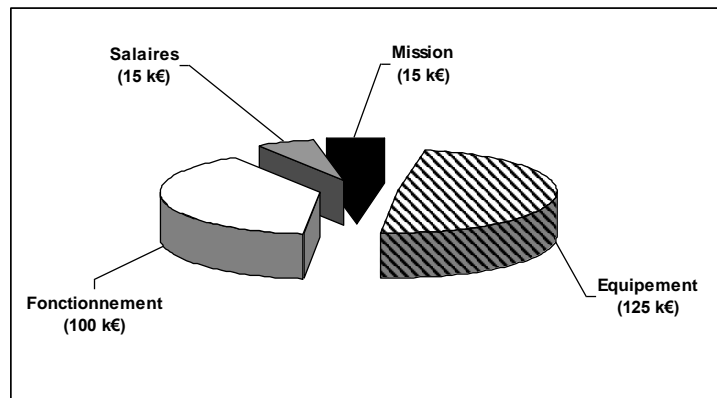


Figure 32. Répartition des crédits obtenus sur la période 1999-2004 entre les différents postes budgétaires (en k€)

En plus de ces crédits, j'ai réussi à convaincre plusieurs de nos partenaires de mettre à notre disposition de nombreuses données dont certaines revêtaient parfois un caractère confidentiel. Ainsi, le Service d'Assainissement de la ville de Paris nous a fourni des résultats d'analyse des matériaux contenus dans les bâches de relevage, les bassins de dessablement. Le Service de Navigation de la Seine nous a confié les résultats concernant la caractérisation des sédiments avant dragage. Ces données si elles avaient dû être produites par le Cereve auraient représenté un investissement considérable. En effet, l'ensemble de ces analyses représente un budget de 320 000 € (les différentes analyses citées précédemment ont un coût unitaire estimés à 400 € environ). De la même façon, dans le cadre du Rouillard, l'ensemble des équipements situés sur le site ont été installés, et parfois même développés (cas du piézomètre permettant de suivre les eaux interstitielles du dépôt), par la société EMCC, qui a mis notre disposition ses moyens logistiques d'entreprise du BTP.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahyerre, M. (1999). Bilan et mécanismes de migration de la pollution organique en réseau d'assainissement unitaire. Thèse de doctorat, *Spécialité Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatique et Géochimie*, Université Paris VI Pierre et Marie Curie, 209 p.
- Azimi, S. (2004). Sources, flux et bilan des retombées atmosphériques de métaux en Ile-de-France. Thèse de doctorat, *Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 337 p.
- Berrekhis, A. (1997). Caractérisation des constituants de la matière organique des sédiments lacustres jurassiens. Contribution à une différenciation des lacs. Thèse de doctorat, *Spécialité Chimie-Physique*, Université de Franche-Comté, 161 p.
- Billon, G., Ouddane, B., Recourt, P. & Boughriet, A. (2002). Depth Variability and some Geochemical Characteristics of Fe, Mn, Ca, Mg, Sr, S, P, Cd and Zn in Anoxic Sediments from Authie Bay (Northern France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **55**(2), 167-181.
- Bussy, A.-L. (1996). Mobilité des métaux dans un système fluvial urbain. Thèse de doctorat, *Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement*, Université Paris XII-Val de Marne, 221 p. + annexes.
- Canler, J. (2001). *Performances des systèmes de traitement biologique aérobie d'élimination des graisses*. FNDA, n°24, CEMAGREF, 80 p.
- Carpentier, S. (2002). Bilans et impacts de la mise en dépôt de sédiments fluviaux urbains dans le Bassin de la Seine. Thèse de doctorat, *Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement*, Université Paris XII-Val de Marne, 210 p. + annexes.
- Carpentier, S., Moilleron, R., Beltran, C., Hervé, D. & Thévenot, D. R. (2002a). Quality of dredged material in the River Seine basin (France). I. Physico-chemical properties. *The Science of The Total Environment*, **295**(1-3), 101-113.
- Carpentier, S., Moilleron, R., Beltran, C., Hervé, D. & Thévenot, D. R. (2002b). Quality of dredged material in the river Seine basin (France). II. Micropollutants. *The Science of The Total Environment*, **299**(1-3), 57-72.
- Carpentier, S., Moilleron, R. & Thévenot, D. R. (2002c). *Fate of dredged contaminated sediments in an underwater disposal site*. In Characterization of Contaminated Sediments. Editeurs : Marco Pellei, Augusto Porta et Robert E. Hinchee, S1-1, 189-196.
- Carreira, R. S., Wagener, A. L. R. & Readman, J. W. (2004). Sterols as markers of sewage contamination in a tropical urban estuary (Guanabara Bay, Brazil): space-time variations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **60**(4), 587-598.
- Cavalli, E., Guinchard, C. & Moilleron, R. (1996). Global optimization of separation in High Performance Liquid Chromatography. *Journal of Chromatographic Science*, **34**(4), 185-189.
- Chebbo, G. (1992). Solides des rejets pluviaux urbains. Caractérisation et traitabilité. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 413 p.
- Chebbo, G., Bertrand-Krajewski, J.-L., Gromaire, M. C. & Aires, N. (2003). Répartition des polluants des eaux urbaines par classes de vitesses de chutes. Partie A : description des protocoles de mesure. *Techniques Sciences et Méthodes*, **12**, 50-58.
- Cossa, D., Meybeck, M., Idlafkih, Z. & Bombled, B. (1994). *Etude pilote des apports de contaminants par la Seine*. In Rapport d'étude IFREMER, AESN et Ministère de l'Environnement, Nantes, Nanterre, Reuilly, 151 p.
- De Marsily, G., Meybeck, M. & Fustec, E. (1998). *La Seine en son bassin : Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Elsevier, Paris, Amsterdam, Lausanne, New York, Oxford, 749 p.
- Estèbe, A. (1996). Impact de l'agglomération parisienne et de ses rejets urbains de temps de pluie sur les concentrations en métaux des matières en suspension et des sédiments en Seine en

- période estivale. Thèse de doctorat, *Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement*, Université Paris XII-Val de Marne, 244 p.
- Estèbe, A., Boudries, H., Mouchel, J.-M. & Thévenot, D. R. (1997). Urban runoff impacts on particulate metal and hydrocarbon concentrations in river seine: suspended solid and sediment transport. *Water Science and Technology*, **36**(8-9), 185-193.
- Fernandes, M. B., Sicre, M.-A., Boireau, A. & Tronczynski, J. (1997). Polyaromatic hydrocarbon (PAH) distributions in the Seine River and its estuary. *Marine Pollution Bulletin*, **34**(11), 857-867.
- Garnaud, S. (1999). Transfert et évolution géochimique de la pollution métallique en bassin versant urbain. Thèse de doctorat, *Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 396 p + annexes.
- Gocht, T., Moldenhauer, K.-M. & Puttmann, W. (2001). Historical record of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and heavy metals in floodplain sediments from the Rhine River (Hessisches Ried, Germany). *Applied Geochemistry*, **16**(15), 1707-1721.
- Gonzalez, A. (2001). Transport et distribution des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques dans le bassin Versant Urbain Expérimental du Marais à Paris. Thèse de doctorat, *Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement*, Université Paris XII-Val de Marne, 313 p.
- Gourlay, C., Miège, C., Garric, J., Tusseau-Vuillemin, M.-H. & Mouchel, J.-M. (2002). The use of the spectrofluorimetry for the monitoring of PAH bioaccumulation and biotransformation in daphnia magna. *Journal of Polycyclic Aromatic Compounds*, **22**(3-4), 501-516.
- Gromaire, M. C. (1998). La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire : origines et caractéristiques. Thèse de doctorat, *Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 507 p.
- Horowitz, A. J., Meybeck, M., Idlafkih, Z. & Biger, E. (1999). Variations in trace element geochemistry in the Seine River Basin based on floodplain deposits and bed sediments. *Hydrological Processes*, **13**(9), 1329-1340.
- Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J. & Tanaka, N. (2000). An integrated aerobic/anaerobic approach for prediction of sulfide formation in sewers. *Water Science and Technology*, **41**(6), 107-115.
- Lefebvre, X., Paul, E., Mauret, M., Baptiste, P. & Capdeville, B. (1998). Kinetic characterization of saponified domestic lipid residues aerobic biodegradation. *Water Research*, **32**(10), 3031-3038.
- Lévêque, C. (1996). *Ecosystèmes aquatiques*. Hachette, Paris, 160 p.
- Levi, Y. (1999). Les micropolluants à effets modulateurs endocriniens. *Spectra Analyses*, **280**(5/6), 19-22.
- Marty, Y., Quéméneur, M., Aminot, A. & Le Corre, P. (1996). Laboratory study on degradation of fatty acids and sterols from urban wastes in seawater. *Water Research*, **30**(5), 1127-1136.
- Moillon, R., Berrekhis, A., Vidonne, A. & Remy, F. (1996). HPLC and ninhydrin photometric determination of amino acids in CaCO₃ rich lacustrine sediments of the Jura region, France. *Annals of Limnology*, **32**(3), 197-204.
- Naylor, C., Davison, W., Motelica-Heino, M., Van Den Berg, G. A. & Van Der Heijdt, L. M. (2004). Simultaneous release of sulfide with Fe, Mn, Ni and Zn in marine harbour sediment measured using a combined metal/sulfide DGT probe. *Science of The Total Environment*, **328**(1-3), 275-286.
- Oms, C. (2003). Localisation, nature et dynamique de l'interface eau-sédiment en réseau d'assainissement unitaire. Thèse de doctorat, *Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 186 p.
- Palermo, M. R. (1998). Design considerations for in-situ capping of contaminated sediments. *Water Science and Technology*, **37**(6-7), 315-321.

- Peng, X., Zhang, G., Mai, B., Min, Y. & Wang, Z. (2002). Spatial and temporal trend of sewage pollution indicated by coprostanol in Macao Estuary, southern China. *Marine Pollution Bulletin*, **45**(1-12), 295-299.
- Peters, A. J., Zhang, H. & Davison, W. (2003). Performance of the diffusive gradients in thin films technique for measurement of trace metals in low ionic strength freshwaters. *Analytica Chimica Acta*, **478**(2), 237-244.
- Petersen, W., Wallmann, K., Li, P., Schroedrer, F. & Knauth, H. D. (1996). *The influence of diagenetic processes on the exchange of trace contaminants at the sediment-water interface*. In Sediment and toxic substances, Verlag Berlin Heidelberg, 37-50.
- Quéméneur, M. & Marty, Y. (1994). Fatty acids and sterols in domestic wastewaters. *Water Research*, **28**(5), 1217-1226.
- Rocher, V. (2003). Introduction et stockage des hydrocarbures et des éléments métalliques dans le réseau d'assainissement unitaire parisien. Thèse de doctorat, *Spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement*, Université Paris XII-Val de Marne, 222 p.
- Ross, S. M. (1994). *Retention, transformation and mobility of toxic metals in soils*. In Ross S.M. (Ed), Toxic metals in soil-plant systems. J. Wiley & Sons Ltd, 63-152.
- Tanaka, N. & Hvitved-Jacobsen, T. (2001). Sulfide production and wastewater quality – investigations in a pilot plant pressure sewer. *Water Science and Technology*, **43**(5), 129-136.
- Tanaka, N., Hvitved-Jacobsen, T. & Horie, T. (2000). Transformations of carbon and sulfur wastewater components under aerobic-anaerobic transient conditions in sewer systems. *Water Environment Research*, **72**(6), 651-664.
- Thévenot, D., Meybeck, M. & Lestel, L. (2002). Métaux lourds : des bilans en mutation. *Piren-Seine Rapport de synthèse*, 78 p.
- Torre, M. C. A.-D. I., Beaulieu, P.-Y. & Tessier, A. (2000). In situ measurement of trace metals in lakewater using the dialysis and DGT techniques. *Analytica Chimica Acta*, **418**(1), 53-68.
- Vale, C., Ferreira, A., Micaelo, C., Caetano, M., Pereira, E., Madureira, M. & Ramalhosa, E. (1998). Mobility of contaminants in relation to dredging operations in a mesodital estuary (Tagus estuary, Portugal). *Water Science and Technology*, **37**(6-7), 25-31.
- Wang, Z. & Fingas, M. F. (2003). Development of oil hydrocarbon fingerprinting and identification techniques. *Marine Pollution Bulletin*, **47**(9-12), 423-452.
- Yamashiro, H., Oku, H., Higa, H., Chinen, I. & Sakai, K. (1999). Composition of lipids, fatty acids and sterols in Okinawan corals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, **122**(4), 397-407.
- Yunker, M. B. & Macdonald, R. W. (2003). Petroleum biomarker sources in suspended particulate matter and sediments from the Fraser River Basin and Strait of Georgia, Canada. *Organic Geochemistry*, **34**(11), 1525-1541.
- Yunker, M. B., Macdonald, R. W., Vingarzan, R., Mitchell, R. H., Goyette, D. & Sylvestre, S. (2002). PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic Geochemistry*, **33**(4), 489-515.
- Zhang, H., Davison, W., Miller, S. & Tych, W. (1995). In situ high resolution measurements of fluxes of Ni, Cu, Fe, and Mn and concentrations of Zn and Cd in porewaters by DGT. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**(20), 4181-4192.
- Zhang, H., Davison, W., Mortimer, R., Krom, M., Hayes, P. & Davies, I. (2002). Localised remobilization of metals in a marine sediment. *The Science of The Total Environment*, **296**, 175-187.

NOTICE

CURRICULUM VITÆ

Nom patronymique : **MOILLERON**
Prénoms : **Régis, Henri, Roger**
Date de naissance : **18 / 01 / 67 à Langres (52)**
Situation de Famille : **Marié, deux enfants**
Adresse professionnelle: **Cereve**
Faculté des Sciences et de Technologie, Université Paris XII-Val de Marne
61 Avenue du Général de Gaulle 94010 CRETEIL (France)
Téléphone : **01 45 17 16 22** Fax : **01 45 17 16 27** E-mail : **moilleron@univ-paris12.fr**
Emploi actuel : **Maître de Conférences (4^{ème} échelon), 32^{ème} section (CNU)**

CURSUS UNIVERSITAIRE

- 1998** Titularisation Maître de Conférences au Cereve à l'Université Paris XII-Val de Marne
- 1997** Nomination Maître de Conférences au Cereve à l'Université Paris XII-Val de Marne
- 1992-96** **Doctorat de l'Université de Franche-Comté, spécialité Chimie Physique, Mention très honorable avec félicitations écrites des membres du jury**, mémoire n°545 : « Rétention d'herbicides par des sols. Influence de la matière organique et de la température. » sous la direction du Professeur François Rémy.
Université de Franche Comté, Besançon (25)
Composition du Jury :
Rapporteurs : Raoul Calvet, Professeur à l'INA de Paris Grignon
Pierre Scribe, Directeur de Recherche CNRS à Paris VI
Examineurs : Jacques Pagetti, Professeur à l'Université de Franche-Comté
François Rémy, Professeur à l'Université de Franche-Comté
Alain Vidonne, Maître de Conférences à l'Université de Franche-Comté
- 1990-91** **DEA de Chimie Physique, Mention bien**, mémoire n°1364 : « Méthodes de dosage des acides aminés dans les sédiments lacustres »
Université de Franche Comté, Besançon (25)
- 1989-90** **Maîtrise de Chimie et Electrochimie Appliquées, Mention bien**
Université de Franche Comté, Besançon (25)
- 1988-89** **Higher National Diploma of Chemistry & Graduateship of the Royal Society of Chemistry part I, Mention très bien**
Polytechnic, Huddersfield (Angleterre)
- 1986-88** **DUT de Chimie**
IUT de Chimie, Besançon (25)

**PUBLICATIONS ET
COMMUNICATIONS
SCIENTIFIQUES**

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

I. Publications

I.1 Publications dans des revues internationales à comité de lecture

- P1. Global optimization of separation in High Performance Liquid Chromatography, E. Cavalli / C. Guinchard / R. Moilleron ; *Journal of Chromatographic Science*, **1996** 34(4) : 185-189.
- P2. HPLC and ninhydrin photometric determination of amino acids in CaCO₃ rich lacustrine sediments of the Jura region, France, R. Moilleron / A. Berrekhis / A. Vidonne / F. Rémy ; *Annals of Limnology*, **1996** 32(3) : 197-204.
- P3. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban runoff samples from an experimental catchment (Le Marais) in Paris, A Gonzalez / R Moilleron / G. Chebbo / D. R. Thévenot, *Polycyclic Aromatic Compounds*, **2000** 20(1-4) : 1-20.
- P4. Determination of aliphatic hydrocarbons in urban runoff samples from the "Le Marais" experimental catchment in Paris centre, R. Moilleron / A. Gonzalez / G. Chebbo / D. R. Thévenot, *Water Research*, **2002** 36(5) : 1275-1285.
- P5. Quality of dredged material in the river Seine basin (France). I Physico-chemical properties, S. Carpentier / R. Moilleron / C. Beltran / D. Hervé / D. R. Thévenot, *The Science of Total Environment*, **2002** 295 : 101-113.
- P6. Quality of dredged material in the river Seine basin (France): II Micropollutant, S. Carpentier / R. Moilleron / C. Beltran / D. Hervé / D. R. Thévenot, *The Science of Total Environment*, **2002** 299(1-3) : 57-72.
- P7. Biofilm in combined sewers: wet weather pollution sources or/and dry weather pollution indicators ?, V. Rocher / S. Azimi / R. Moilleron / G. Chebbo, *Water, Science, and Technology*, **2003** 47(4) : 35-43.
- P8. Hydrocarbon pollution fixed to combined sewer sediment: a case study in Paris, V. Rocher / S. Garnaud / R. Moilleron / G. Chebbbo, *Chemosphere*, **2004** 54 : 795-804.
- P9. Hydrocarbons and heavy metals in the different sewer deposits in the "Le Marais" catchment (Paris, France): stocks, distributions and origins, V. Rocher / S. Azimi / R. Moilleron / G. Chebbo, *The Science of Total Environment* **2004** 323(1-3) : 107-122.
- P10. Hydrocarbons and metals in atmospheric depositions: comparison with roof runoff , V. Rocher / S. Azimi / J. Gasperly / L. Beuvin / M. Muller / R. Moilleron / G. Chebbo, *Water, Air and Soil Pollution* **2004** (sous presse).
- P11. Spatial and temporal variability of trace metals and hydrocarbons in atmospheric deposition: case of the Ile de France area (France), S. Azimi / V. Rocher / M. Muller / R. Moilleron / D. R. Thévenot, *The Science of Total Environment* **2004** (sous presse).
- P12. Contribution of different sources to the hydrocarbon pollution during a rain event at the scale of an experimental catchment in Paris centre, A. Gonzalez / R. Moilleron / G. Chebbo / D. R. Thévenot, *Urban Water* **2004** (sous presse).

I.2 Publications dans des revues françaises à comité de lecture

- PF1. Distribution des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, R. Moilleron / A. Gonzalez / D. R. Thévenot, *TSM : Dossier « Génération et transport de la pollution urbaine par temps de pluie »*, **2001** 5 : 60-71.
- PF2. Contribution des différentes sources à la pollution des effluents unitaires de temps de pluie, M.C. Gromaire-Mertz / S. Garnaud / R. Moilleron / G. Chebbo, *TSM : Dossier « Génération et transport de la pollution urbaine par temps de pluie »*, **2001** 5 : 72-86.
- PF3. Impact environnemental de la mise en dépôt en eau de matériaux de dragage (Cas du bassin de la Seine), S. Carpentier / R. Moilleron / D. R. Thévenot / C. Beltran / D. Hervé ; *La Houille Blanche*, **2001** 8 : 82-86.

- PF4. Étude de la pollution en hydrocarbures des dépôts grossiers sur l'ensemble du réseau d'assainissement de la ville de Paris, V. Rocher / S. Garnaud / R. Moilleron/ G. Chebbo, In « *Eau dans la ville et développement durable* », Ponts Presses Editions, **2003** : 39-47.
- PF5. Pollution métallique associée au dépôt du réseau d'assainissement unitaire parisien, V. Rocher / S. Azimi / S. Garnaud / R. Moilleron / G. Chebbo, *TSM*, **2003** 10 : 75-86.
- PF6. Hydrocarbures et métaux lourds associés aux sédiments de stations de relevage de l'agglomération parisienne, V. Rocher / J. Gasperly / S. Azimi / T. Celaudon / R. Moilleron / G. Chebbo ; *La Houille Blanche*, **2004** 2 : 22-30.

I.3 Publications dans des actes de colloques internationaux à comité de lecture

- Pr.1. Significance of dissolved and particulate metal and hydrocarbon determination in urban runoff sample, A. Gonzalez / S. Garnaud / S. Carpentier / R. Moilleron / D. R. Thévenot, *8th Urban Storm Drainage Proceedings (Sydney)*, **1999** : Vol. 4, 1816-1824.
- Pr.2. Impact environnemental de la mise en dépôt en eau de matériaux de dragage (Cas du bassin de la Seine), S. Carpentier / R. Moilleron / D. R. Thévenot / C. Beltran / D. Hervé, Publications SHF « *Gestion des sédiments : de la source à la mer* », **2001** : 173-180.
- Pr.3. Fate of dredged contaminated sediments in an underwater disposal site, S. Carpentier / R. Moilleron / D. R. Thévenot; *Characterization of Contaminated Sediments* Editeurs : Marco Pellei, Augusto Porta et Robert E. Hinchee, Battelle Press, **2002** (S1-1) : 189-196.
- Pr.4. Characterisation of the hydrocarbon pollution in the sewer bed sediment in the whole combined sewer of Paris, V. Rocher / S. Garnaud / R. Moilleron / G. Chebbbo, *5th IWA chemical industry group conference: trends in sustainable production : from wastewater diagnosis to toxicity management and ecological protection Proceedings (Nimes)*, **2002** : 379-382.
- Pr.5. Monitoring of the underwater disposal site of the Rouillard (France) after its filling completion, R. Moilleron / S. Carpentier / D. R. Thévenot; *Characterization of Contaminated Sediments*, Battelle Press (sous presse).

I.4 Publications soumises à des revues internationales à comité de lecture

- S1. Grain size distribution of heavy metals and PAHs in silt trap sediments from the combined sewer network of Paris (France), R. Moilleron / J. Perez / S. Garnaud, *Water, Science, and Technology*, **2004** soumis.
- S2. Hydrocarbons and heavy metals fixed to the lift station sediment of the Paris combined sewer, J. Gasperi / V. Rocher / T. Celaudon / R. Moilleron / G. Chebbo, *Water, Science, and Technology*, **2004** soumis.
- S3. Hydrocarbon loads from street cleaning practices: contribution to combined sewer systems, J. Gasperi / V. Rocher / R. Moilleron / G. Chebbo, *Environmental Science and Pollution Research*, **2004** soumis.

II. Rapports d'activités

- R1. Mobilisation de polluants lors de la mise en dépôt de sédiments fluviaux, S. Carpentier / S. Jumeau / R. Moilleron / D. R. Thévenot; PIREN-Seine, *Rapport d'activités 1998*, **1999** (février) : 5.47-5.50.
- R2. Evaluation des flux et modalités de transport des hydrocarbures en bassin versant urbain, A. Gonzalez-Calderon / S. Carpentier / R. Moilleron / N. Apperry / G. Chebbo / J-M Mouchel / D. R. Thévenot; Agence de l'Eau Seine Normandie, *Rapport final de la convention n°955634*, **1999** (novembre) : 88p + annexes.
- R3. Mobilisation de polluants lors de la mise en dépôt de sédiments fluviaux, S. Carpentier / S. Jumeau / R. Moilleron / D. R. Thévenot, PIREN-Seine; *Rapport d'activités 1999*, **2000** (février) : 5.56-5.79.
- R4. Identification des sources d'hydrocarbures en milieu urbain : approche automatisée, V. Rocher / R. Moilleron; PIREN-Seine, *Rapport d'activité 2000*, **2001** (février) : 5.1-5.11.
- R5. Mobilisation de polluants lors de la mise en dépôt de sédiments fluviaux, S. Carpentier / R. Mulette / R. Moilleron / D. R. Thévenot, PIREN-Seine; *Rapport d'activités 2000*, **2001** (février) : 5.105-5.129.

- R6. Sédiments fluviaux avant dragage, S. Carpentier / R. Moilleron / D. R. Thévenot; *In Métaux lourds : des bilans en mutation (Rapport de synthèse du programme PIREN-Seine 1998-2001)*, D. R. Thévenot / M. Meybeck / L. Lestel, **2002** chapitre 2.5 : 26-30.
- R7. Impact des dragages fluviaux et mise en dépôts, S. Carpentier / R. Moilleron / D. R. Thévenot; *In Métaux lourds : des bilans en mutation (Rapport de synthèse du programme PIREN-Seine 1998-2001)*, D. R. Thévenot / M. Meybeck / L. Lestel, **2002** chapitre 3.4 : 47-48.
- R8. Variation spatiale et temporelle des retombées atmosphériques de métaux et d'hydrocarbures en région parisienne, S. Azimi / V. Rocher / M. Muller / R. Moilleron / D. Thévenot, *PIREN-Seine, Rapport d'activités 2002 (sur CD-Rom)*, **2003** : 15 p.
- R9. Identification des sources d'hydrocarbures en milieu urbain, I. Recherche de traceurs, R. Moilleron / V. Rocher, Agence de l'Eau Seine Normandie, *Rapport intermédiaire projet OPUR*, **2003** (septembre) : 72 p.
- R10. Pollution des boues de la station d'épuration de Voulx (77) par les hydrocarbures, R. Moilleron / C. Lorgeoux, Agence de l'Eau Seine Normandie, *Rapport préliminaire*, **2003** (décembre) : 39 p.
- R11. Evolution des matériaux de dragage après mise en dépôt en gravières : importance des paramètres biotiques et abiotiques (cas du site du Rouillard), R. Moilleron / N. Bousserhine / G. Varrault / S. Abbad-Andaloussi / D. Hervé / D.R. Thévenot, *PIREN-Seine, Rapport d'activités 2003 (sur CD-Rom)*, **2004** : 18 p.

III. Communications

III.1 Communications internationales

- C1. Significance of dissolved and particulate metal and hydrocarbon determination in urban runoff sample, A. Gonzalez / S. Garnaud / S. Carpentier / R. Moilleron / D. R. Thévenot; 8th International Conference on Urban Storm Drainage (Sydney), **août 1999** (Orale).
- C2. Determination of aromatic hydrocarbons in urban runoff samples from an experimental catchment (Le Marais) in Paris, A Gonzalez / R. Moilleron / G. Chebbo / D. R. Thévenot, 17th International Symposium on Polycyclic Aromatic Compounds (Bordeaux), **octobre 1999** (Orale).
- C3. Mobilisation of pollutants during the storage of urban river sediments, S. Carpentier / S. Jumeau / R. Moilleron / D. R. Thévenot, 17th International Symposium on Polycyclic Aromatic Compounds (Bordeaux), **octobre 1999** (Affiche).
- C4. Fate of dredged contaminated sediments in an underwater disposal site, S. Carpentier / R. Moilleron / D. R. Thévenot; 1st International Conference on Remediation of Contaminated Sediments (Venise), **octobre 2001** (Orale).
- C5. Biofilm in combined sewers: wet weather pollution sources or/and dry weather pollution indicators ?, V. Rocher / S. Azimi / R. Moilleron / G. Chebbo, Sewer Processes and Network Conference (Paris), **avril 2002** (Orale).
- C6. Characterisation of the hydrocarbon pollution in the sewer bed sediment in the whole sewer network of Paris, V. Rocher / S. Garnaud / R. Moilleron / G. Chebbbo, 5th IWA chemical industry group conference: trends in sustainable production : from wastewater diagnosis to toxicity management and ecological protection (Nimes), **novembre 2002** (Affiche).
- C7. Monitoring of the underwater disposal site of the Rouillard (France) after its filling, R. Moilleron / S. Carpentier / D.R. Thévenot; 2nd International Conference on Remediation of Contaminated Sediments (Venise), **octobre 2003** (Orale).
- C8. Impact of autochthonous bacteria on solubilisation of metals in dredged contaminated sediments, N. Bousserhine / S. Abbad Andaloussi / G. Varrault / R. Moilleron, 2nd International Conference on Remediation of Contaminated Sediments (Venise), **octobre 2003** (Orale).

- C9. Hydrocarbon loads from street cleaning practices: contribution to combined sewer systems, J. Gasperi / V. Rocher / R. Moilleron / G. Chebbo, 3rd World Wide Workshop "Discharged urban waters: resource or risk?"-YES 2004 (Vitry sur Seine), **mai 2004** (Orale).
- C10. Contribution of the street cleaning practices to the hydrocarbon loads to combined sewer systems, J. Gasperi / V. Rocher / R. Moilleron / G. Chebbo, 9th Conference on chemistry and the Environmental (Bordeaux) **septembre 2004 (accepté)** (Orale).
- C11. Impact of the bacterial activity on trace metal solubilization: the case of the underwater disposal site of the Rouillard (France), N. Bousserhine / M. Fakih / G. Varrault / S. Abbad Andaloussi / R. Moilleron, 9th Conference on chemistry and the Environmental (Bordeaux) **septembre 2004 (accepté)** (Orale).
- C12. Grain size distribution of heavy metals and PAHs in silt trap sediments from the combined sewer network of Paris (France), R. Moilleron / J. Perez / S. Garnaud, Sewer Processes and Network Conference (Funchal, Portugal) **novembre 2004 (accepté)** (Orale).
- C13. Hydrocarbons and heavy metals fixed to the lift station sediment of the Paris combined sewer, J. Gasperi / V. Rocher / T. Celaudon / R. Moilleron / G. Chebbo, Sewer Processes and Network Conference (Funchal, Portugal) **novembre 2004 (accepté)** (Orale).

III.2 Communications nationales

- CN1. Adsorption d'herbicides par des sols agricoles, R. Moilleron, Quatrième Rencontre de l'Ecole Doctorale « Louis Pasteur » et de la S.F.C. section Bourgogne-Franche-Comté (Dole), **mai 1995** (Affiche).
- CN2. Influence de la température sur la fixation d'herbicides par des sols agricoles, R. Moilleron / F. Rémy, 12^{ème} colloque « Journées Informations Eaux » (Poitiers), **septembre 1996** (Affiche).
- CN3. Mobilisation de polluants lors de la mise en dépôt de sédiments fluviaux, S. Carpentier / S. Jumeau / R. Moilleron / D. R. Thévenot; Colloque PIREN-Seine 1999 (Paris), **janvier 2000** (Orale).
- CN4. Origine, cycle et effets des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, R. Moilleron / D. R. Thévenot; Atelier Micropolluants Organiques du PIREN-Seine : de la recherche des sources à la gestion des problèmes (Paris), **30 mai 2000** (Orale).
- CN5. Mobilisation de polluants lors de la mise en dépôt de sédiments fluviaux, S. Carpentier / R. Mulette / R. Moilleron / D. R. Thévenot; Colloque PIREN-Seine 2000 (Paris), **janvier 2001** (Orale).
- CN6. Impact environnemental de la mise en dépôt en eau de matériaux de dragage (Cas du bassin de la Seine), S. Carpentier / R. Moilleron / D. R. Thévenot / C. Beltran / D. Hervé; Colloque sur la « gestion des sédiments : de la source à la mer » (Lyon), **mars 2001** (Orale).
- CN7. Suivi de la mise en dépôt de matériaux de dragage : cas du site du Rouillard, S. Carpentier / R. Moilleron / D. R. Thévenot; Journées techniques sur le dragage (Paris – La Défense), **13-14 mars 2001** (Orale).
- CN8. Impact environnemental de la mise en dépôt de matériaux de dragage sur le site du Rouillard (78), R. Moilleron; Journées de la recherche de la Faculté de Sciences et Technologie Paris XII Val de Marne (Créteil), **10 mai 2001** (Orale).
- CN9. Étude de la pollution en hydrocarbures du dépôt grossier sur l'ensemble du réseau d'assainissement parisien, V. Rocher / S. Garnaud / R. Moilleron / G. Chebbo, 13^{ème} Journées Sciences et Techniques de l'Environnement "Eau dans la ville et développement durable" (Créteil), **mai 2002** (Orale).
- CN10. Retombées atmosphériques en micropolluants : bilan et modes de dépôt des métaux (alcalins, alcalino-terreux, métaux lourds et mercure) et des polluants organiques persistants (hydrocarbures aliphatiques et aromatiques et polychlorobiphényles) sur le bassin de la Seine, S. Azimi / V. Rocher / M. Muller / R. Moilleron / D. Thévenot / C. Rousseau / S. Leblond / J.L. Colin / M. Coquery / M. Blanchard / B. Garban / D. Ollivon / M-J Teil / M. Chevreuil, Colloque PIREN-Seine 2002 (Paris), **février 2003** (Orale).

CN11. OPUR: un observatoire des polluants urbains à Paris, G. Chebbo / M.C. Gromaire / R. Moilleron / M. Benyahia / V. Rocher / M. Saad / A. Constant / P. Obry / M. Ahyerre / N. Aires / J.P. Tabuchi / O. Rousselot / M. Gousailles, NOVATECH'2004 5^{ième} conférence internationale sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie (Lyon), **avril 2004** (Affiche).

IV. Synthèse

Le Tableau 5 ci-dessous résume ma production scientifique depuis 1992. Ainsi, la valorisation de mon doctorat a conduit à 2 publications internationales et 2 communications par affiche dans des colloques nationaux. Depuis mon arrivée au Cereve, en 1997, et mon investissement dans les deux axes de recherche présentés dans ce mémoire (la gestion des sédiments de dragage et les micropolluants en milieu urbain), ma production scientifique s'est développée : 10 publications internationales, 6 nationales, 5 actes de colloques et 22 communications (13 internationales et 11 nationales). La préparation de publications dans des revues françaises ou la rédaction de rapports d'activité, souligne mon souci d'offrir à nos partenaires (bien souvent également financeurs) la possibilité d'exploiter et de diffuser les résultats de nos collaborations au sein de leur organisme.

Tableau 5. Bilan de la valorisation de mes activités de recherche de 1992 à 2004

	Publications			Rapports d'activité	Communications	
	Internationales	Nationales	Actes colloques		Internationales	Nationales
1992-1997	2					2 (0+2)
1997-2004	10	6	5	11	13 (11*+2**)	9 (8+1)
Total	12	6	5	11	13 (11+2)	11 (8+3)

* : communications orales ; ** : communications par affiches

**ENCADREMENT DE
TRAVAUX SCIENTIFIQUES
D'ETUDIANTS**

ENCADREMENT DE TRAVAUX SCIENTIFIQUES D'ETUDIANTS

I. Doctorat en Sciences et Techniques de l'Environnement

1. GONZALEZ Ana, Transport et distribution des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques dans le bassin Versant Urbain Expérimental du Marais à Paris, **1998-2001 (co-encadrement avec le Pr. D. Thévenot)**.
2. CARPENTIER Sonia, Bilans et impacts de la mise en dépôt de sédiments fluviaux urbains dans le bassin de la Seine, **1998-2002 (co-encadrement avec le Pr. D. Thévenot)**.
3. ROCHER Vincent, Introduction et stockage des hydrocarbures et des éléments traces métalliques dans le réseau d'assainissement unitaire parisien, **2000-2003 (directeur, co-encadrement avec G. Chebbo, DR ENPC)**.
4. GASPERI Johnny, Evaluation des flux et des sources d'hydrocarbures aliphatiques et aromatiques à différentes échelles de bassins versants urbains emboîtés, **2003-...** (co-encadrement avec G. Chebbo, DR ENPC).

II. DEA Sciences et Techniques de l'Environnement

1. CARPENTIER Sonia, Validation d'une méthode d'analyse d'hydrocarbures d'origines urbaines (BVUE du Marais, Paris), **1997-98** (44 p. + annexes).
2. RETHORET Harold, Echantillonnage des Matières En Suspension fluviales : nouvelle approche des trappes à MES, **1997-98** (46 p. + annexes).
3. JUMEAU Sandrine, Devenir de la contamination en hydrocarbures lors de la mise en dépôt des produits de dragages, **1998-99** (45p. + annexes).
4. ROCHER Vincent, Identification des sources d'hydrocarbures en milieu urbain, **1999-2000** (47 p. +annexes).
5. MULLER Mathieu, Identification et caractérisation des apports d'hydrocarbures au réseau d'assainissement de la Ville de Paris, **2001-2002** (58 p. + annexes). Co-encadrement avec Vincent Rocher.
6. GASPERI Johnny, Caractérisation des Voies d'Introduction dans le Réseau d'Assainissement (VIRA) de micropolluants : cas de la Ville de Paris, **2002-2003** (72 p. + annexes). Co-encadrement avec Vincent Rocher.
7. PEREZ Jenny, Gestion environnementale des boues de chambres à sable du réseau d'assainissement de la Ville de Paris : cas des éléments métalliques, **2003-2004** (55 p. + annexes).
8. LACHAIZE Eugénie, *La dynamique des graisses en réseau d'assainissement : état de l'art sur les connaissances (en collaboration avec la Ville de Paris), 2004...*
9. LEROUX Carole, *Etude de la pollution en hydrocarbures et éléments métalliques de la station d'épuration Marne Aval (en collaboration avec le SIAAP), 2004...*

III. Maîtrise de Chimie (C), de Biologie (B), d'Environnement (E) et MST Génie Sanitaire et Environnement (GSE)

1. GOMY Marion, GRELE Laurent, 2 mois, **mai-juin 1999** : *Modification du protocole expérimental d'analyse des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques sous forme particulaire*, 45 p (C).
2. SOUBRAND Marilyne, LORY Céline, 2 mois, **mai-juin 2000** : *Analyse des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques sous forme particulaire dans des sédiments dragués*, 37 p (C).
3. TORSET-BONFILLON Florianne, VOGLER Julien, 2 mois, **mai-juin 2001** : *Suivi des teneurs en hydrocarbures dans les laisses de crue du bassin de la Seine*, 23 p + annexes (C).
4. GROULT Brigitte, 2 mois, **mai-juin 2001** : *Etude du projet de loi sur l'eau 2001*, 23 p + annexes (GSE).

5. D'AYGUESVIVES Amélie, 4 mois, **avril-juillet 2001** : *Suivi biologique de l'étang du Rouillard (78)*, 23 p + annexes (B).
6. LAFFRAY Xavier, 2 mois, **avril-mai 2002** : *Validation d'une méthode d'analyse des ions dans les retombées atmosphériques totales*, 37 p + annexes (E).
7. BEZTOUT Sofyan, 3 mois, **mai-juillet 2004** : *Devenir du site de dépôt de matériaux de dragage du Rouillard après son remplissage*, 25 p (C).
8. LEROUX Carole, 3 mois, **mai-juillet 2004** : *Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) dans le bassin de la Seine*, 37 p (C).

IV. Licence de Chimie et Electrochimie Appliquées

1. BERTHON Patricia, 6 semaines, **mai-juin 1994** : *Etude sur le dosage des sulfates*, 25 p.
2. MICHAUD Stéphanie, 6 semaines, **mai-juin 1995** : *Etude de l'extraction SPE du 2,4-D et de l'atrazine*, 25 p.
3. JOINEAU Dominique, 6 semaines, **mai-juin 1996** : *Etude du dosage des COV par SPME*, 25 p.

V. Supervisions de stages scientifiques d'étudiants

Outre la responsabilité des stages scientifiques cités précédemment, j'ai supervisé près d'une trentaine de stages en MST GSE, MST GBB, DESS SAMQCB, Maîtrise de Chimie, etc. Ces supervisions sont généralement accompagnées de rencontres avec l'étudiant et son maître de stage, afin de maintenir le contact entre l'étudiant et sa formation universitaire, et aussi pour développer des relations professionnelles avec le monde industriel (EDF, Jean Henaff SA, Lifmetal, Miko, Procter & Gamble...), les collectivités territoriales ou locales (Ville de Paris, Communauté d'agglomération de Saint Quentin, Communauté Urbaine de Bordeaux...) ou des organismes publics (Commissariat à l'Energie Atomique, Port Autonome de Dunkerque, Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales du Val de Marne, Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments...).

VI. Synthèse

Le Tableau 6 synthétise l'évolution de mes activités d'encadrement de stages scientifiques. Depuis mon arrivée au Cereve en 1997, j'ai toujours encadré au moins un DEA ou un thésard par an. Parmi les thèses auxquelles j'ai participé, j'ai obtenu une dérogation de l'Université Paris XII-Val de Marne pour être directeur de la thèse de Vincent Rocher soutenue en décembre 2003. Pour septembre 2004, deux nouveaux stages de DEA sont déjà d'ors et déjà prévus.

Tableau 6. Synthèse de mes encadrements de travaux scientifiques

	Thèses	DEA	Licence	Maîtrise
1992-1997			3	
1997-2004	3* + 1**	7		8
Total	4	7	3	8

* : thèses soutenues, ** : thèse en cours

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENTS

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

Durant la préparation de mon doctorat réalisé à l'Université de Franche-Comté, j'ai commencé à enseigner comme **vacataire** à l'Institut Universitaire de Technologie (1992-93), en encadrant des travaux pratiques de génie des procédés, destinés aux étudiants de 1^{ère} année de DUT Chimie, et des travaux pratiques de chimie industrielle en 5^{ème} année de Pharmacie. J'ai obtenu ensuite un poste de **moniteur** auprès du CIES de Lyon durant deux ans (1993-95). Rattaché à la Faculté de Médecine et de Pharmacie, je participais à des travaux dirigés de chimie générale et des travaux pratiques de biophysique. J'ai créé un module de sensibilisation sur la « Sécurité dans les laboratoires d'analyse » destinés aux étudiants de 2^{ème} année de Pharmacie. En tant qu'**Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche**, à mi-temps entre 1995 et 1997, à la Faculté des Sciences et Technique, j'ai créé un module de « Chimie Analytique » pour le DESS « Eaux continentales. » Les applications spécifiques au domaine de l'eau de techniques telles que la chromatographie liquide, la chromatographie gazeuse et l'absorption atomique étaient abordés. J'ai également participé à des travaux dirigés et des travaux pratiques de chimie générale et chimie minérale en 1^{ère} année de DEUG.

J'ai été nommé à l'Université Paris XII Val de Marne de Créteil (94) en septembre 1997 pour y occuper les fonctions de Maître de Conférences sur un poste de la section 32 du CNU. La Figure 33 présente l'évolution de mes heures d'enseignement (en équivalent TD) en terme de répartition entre les heures de cours (C), de travaux dirigés (TD) et de travaux pratiques (TP). Depuis 1997, la proportion d'heures de cours que j'ai réalisées n'a fait qu'augmenter pour atteindre 43% pour l'année universitaire 2003-2004. Cette progression est la conséquence de mon implication dans des formations nouvelles tels que le DEUG Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur (STPI) et le DESS Stratégie d'Analyse et Maîtrise de la Qualité en Chimie et Biochimie (SAMQCB) et la création de nouveaux enseignements dans des filières existantes.

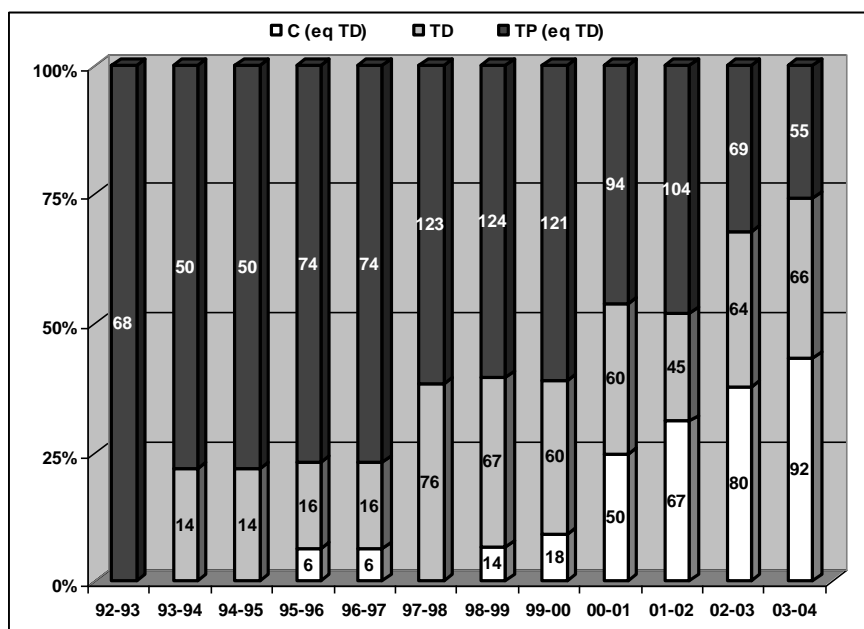


Figure 33 : Evolution de la répartition de mes heures d'enseignement entre cours (C), travaux dirigés (TD) et travaux pratiques (TP) en équivalent TD depuis 1992

Le Tableau 7 détaille la répartition de ces enseignements en 2003-2004 en fonction du cycle et de la filière concernée. Je suis responsable de la majorité des modules dans lesquels j'interviens.

Tableau 7 : Répartition des heures d'enseignement par cycle(s) et filière(s) en 2003-2004

MATIÈRE ENSEIGNÉE	FILIÈRE	C	T D	T P	Responsabilité
1^{er} cycle					
Génie des Procédés	DEUG STPI	12	9	4	module
Bureautique	DEUG STPI	2			module
Projet Professionnel	DEUG STPI	1,5		6	module
2^{ème} cycle					
Environnement	Maîtrise Chimie	3			
Géochimie sécurité	Maîtrise Chimie	9			module
Capteurs	Maîtrise Chimie		21	40	
Capteurs	MST GSE		9	32	
Sécurité Toxicité	MST GSE	9			module
Procédés	MST GSE	10	9,5		module
Génie des Procédés	MST GBB	7,5	3		
3^{ème} cycle					
Capteurs	DESS SAMQCB	3			filière
Stratégie d'analyse	DESS SAMQCB	4			filière

I. 1997-2000 : adaptation des enseignements disponibles

Durant cette première période, une grande partie de mon travail s'est déroulé sur le second cycle. En effet, mes enseignements se situaient à la fois en première et seconde années de la Maîtrise de Sciences et Techniques « Génie Sanitaire et Environnement » (MST GSE) ainsi que dans les cursus de la Licence et de la Maîtrise de Chimie. Mon service se complétait par des interventions plus ponctuelles en DEUG notamment dans le cadre du projet professionnel.

Dès 1999, j'ai développé un enseignement en second cycle (Maîtrise de Chimie option Environnement et MST GSE) en « **hygiène et sécurité.** » Ce cours est né d'un constat : le manque d'informations sur les risques liés à l'utilisation des produits chimiques dans le cadre des travaux pratiques (TP). En effet, une enquête auprès des étudiants en TP, a montré que les consignes de sécurité préconisées par les enseignants (quand elles existaient) étaient ressenties comme des contraintes, ayant une incidence avérée sur leur note, et non comme des outils leur permettant de manipuler en toute sécurité. Le message sur des consignes, qui visent à les protéger tout en réduisant au maximum les accidents, passait difficilement. Ce module aborde le risque chimique et sa prévention, le risque incendie et sa prévention ; des bases de toxicité sont également dispensées. Un volet réglementaire complète cette initiation ; il porte sur les règles élémentaires de sécurité à respecter lors de l'usage de substances potentiellement dangereuses et la gestion des déchets. Cette formation en réactivité et toxicité trouvait pleinement sa place au sein d'un cursus scientifique, même si l'on peut regretter qu'elle arrive seulement en deuxième cycle. Cependant, les étudiants ont acquis une ouverture d'esprit leur permettant d'appréhender ce module avec un esprit plus critique. Ils sont plus mûrs, au regard de leurs expériences de TP voire de stage, pour considérer les problèmes de sécurité. Des intervenants extérieurs sensibilisent les étudiants aux problèmes de la sécurité dans le domaine du nucléaire et dans celui de l'organisation de l'hygiène et sécurité au niveau de l'Université Paris XII-Val de Marne. Monsieur Dominique Especel, ingénieur hygiène et sécurité de l'Université Paris XII-Val de Marne, explique l'importance de la gestion au quotidien des problèmes de sécurité dans un Établissement Recevant du Public (ERP), multidisciplinaire, localisé sur plusieurs sites géographiques. Cette dernière intervention, au-delà de l'hygiène et la sécurité, sensibilise les étudiants à la vie d'un établissement d'enseignement supérieur.

Durant cette phase d'adaptation de 1997 à 2000, dans le module « capteurs », **j'ai pris l'initiative de restructurer les TP existants** pour améliorer les liens entre le cours et les TD (7 séances), d'une part, et les TP (3 manipulations) d'autre part. Deux manipulations ont donc été modifiées et une troisième a été créée. Concernant les deux manipulations modifiées, l'une concerne l'étude d'un capteur à oxygène, l'autre est relative aux électrodes spécifiques ioniques à Na^+ et K^+ . Le capteur à oxygène est désormais utilisé pour étudier la cinétique de la réaction qui intervient entre le glucose et l'oxygène en présence de levure de boulanger (*saccharomyces cerevisiae*). Les étudiants doivent déterminer les ordres partiels des réactifs, l'ordre global de la réaction et enfin calculer l'énergie d'activation du système. Pour les électrodes spécifiques ioniques, après la caractérisation de ces capteurs, la méthode de mesure directe est comparée à celle par ajouts dosés. Cette comparaison est appliquée à la mesure de Na^+ ou K^+ dans des eaux minérales et dans des médicaments (gélules ou comprimés effervescents). Un gros effort est demandé aux étudiants pour qu'ils appréhendent les notions d'incertitudes sur ces mesures. La manipulation nouvelle a trait à la caractérisation d'un capteur spécifique au gaz ammoniac. Les étudiants, grâce à leurs acquis théoriques, doivent justifier expérimentalement les conditions optimales d'utilisation de ce capteur. Un nouveau TP sur la mesure des ions fluorures dans une pâte à dentifrice a été également intégré en alternance avec l'utilisation du capteur à ammoniac.

En 1997, un nouvel enseignement en DEUG Sciences 1^{ère} année, sous l'impulsion de Mme Josselyne Santer, a vu le jour : le « **Projet Professionnel**. » Lors de sa première année d'existence, alors qu'il était encore optionnel, **j'ai fait partie du groupe de travail d'une dizaine d'enseignants qui a défini et structuré cet enseignement**. La fonction de ce groupe était de mettre en place, suivre et évaluer le dispositif qui allait permettre à l'ensemble des étudiants de première ou de deuxième année de DEUG de se questionner sur leur avenir professionnel et d'établir des liens avec leurs études. Depuis 1998, cet enseignement est devenu obligatoire pour l'ensemble des sections de DEUG Sciences 1^{ère} année de l'Université Paris XII-Val de Marne. Le rôle du groupe de départ a donc été de s'adjoindre une équipe élargie d'intervenants afin de la former. L'objectif du « **Projet Professionnel** » est de demander aux étudiants de s'informer sur un métier qu'ils désiraient mieux connaître. L'étudiant choisit un thème de travail ayant trait à une profession, un domaine d'activités, une discipline qui correspond à ce qui l'attire le plus lors de sa première année universitaire (par exemple : l'aéronautique, les métiers de la recherche, l'environnement, etc.). A partir de ce thème, il engage des recherches et entreprend des démarches vers des professionnels avec lesquels il devra s'entretenir. Il est bien entendu que le choix de ce thème n'a pas d'incidence directe sur son cursus. Il doit simplement permettre à l'étudiant d'amorcer une attitude active face à son orientation professionnelle : aux recherches d'information et aux choix qu'elle implique, l'aider à comprendre comment il peut s'orienter plutôt que « d'être orienté. » Je suis actuellement **responsable de ce module d'insertion professionnelle au niveau du DEUG STPI** de la Faculté des Sciences et Technologie sur le site délocalisé de Sénart (77).

II. 2000-2004 : créations de nouveaux enseignements

Depuis 2000, mes enseignements se sont diversifiés et stabilisés en m'impliquant de façon active dans deux nouveaux cursus : le DEUG Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur (STPI), créé en 2000, et le DESS Stratégie d'Analyse et Maîtrise de la Qualité en Chimie et Biochimie (SAMQCB), créé en 2002. Ainsi, en première année du DEUG STPI, **je suis responsable de l'unité d'enseignement de bureautique, dont je suis l'instigateur**, depuis sa création. Il comprend 2 h de cours et 21 h de TP. L'objectif de ce module est de familiariser l'étudiant(e) avec différents volets de la bureautique qui vont de l'architecture d'un ordinateur (de façon très schématique) jusqu'à l'histoire d'Internet en passant par une initiation à certains logiciels de bureautique (traitement de texte et tableur principalement) en se focalisant essentiellement sur la pratique et la mise en situation. Ainsi les cours ne sont-ils qu'un prétexte pour expliquer (si le besoin s'en faisait encore sentir !) combien la maîtrise de la bureautique est désormais indispensable sur le plan professionnel.

Le point de départ de cet enseignement est le décryptage d'une annonce commerciale vantant les mérites d'un PC. A partir du descriptif de la machine, différents concepts sont évoqués comme ceux de mémoire vive (ROM), de mémoire virtuelle (RAM), du BIOS. Les périphériques, les standards utilisés et leur signification sont également évoqués. Par ailleurs, quelques outils et procédures sont proposés aux étudiants pour optimiser la gestion quotidienne de leur ordinateur en utilisant des outils disponibles avec la plupart des environnements. L'enseignement pratique qui constitue le cœur de ce module est schématiquement scindé en deux parties l'une concerne le traitement de texte et la mise en forme d'un document, la seconde montre les possibilités qu'offre un tableur pour une visualisation graphique des données. Le travail se fait sous forme de séance à thème, de 3 h chacune, dont la première phase est dédiée à l'acquisition de nouvelles connaissances, la deuxième phase est la mise en pratique sous forme d'exercices d'applications, qui doivent permettre à l'issue de la séance l'autonomisation des étudiants. Le contenu des enseignements pour le traitement de texte sont les fonctions de base du logiciel, la mise en forme d'un document, la création de styles automatiques, de sommaires, le légendage des illustrations, la tabulation, l'insertion d'images et/ou graphiques... Pour le tableur, les enseignements portent sur les fonctions de bases, la réalisation de figure puis leur intégration dans un document texte. Les acquis souhaités sont donc des connaissances sur la constitution d'un ordinateur, sa maintenance « au quotidien », la rédaction et la mise en forme d'un document texte et l'utilisation d'un tableur pour illustrer ce document.

Dans le cadre de ce même DEUG STPI, en deuxième année, **j'ai la responsabilité de l'unité d'enseignement de génie des procédés, que j'ai créée**, comprenant des cours (12 h), TD (9 h) et TP (4 h). Cet enseignement a pour objectif de fournir aux étudiants les connaissances de bases sur les procédés de production à l'échelle industrielle. L'accent est plus particulièrement mis sur les opérations unitaires de base. Ce module s'articule autour de trois axes. Une partie introductive sur le génie chimique et sa terminologie permet aux étudiants de se familiariser avec des concepts généralement nouveaux pour eux. Les opérations unitaires telles que la filtration, la distillation, la rectification et l'extraction par solvant sont ensuite abordées sur les plans théorique et pratique. Les différences de fonctionnement entre les réacteurs continus et discontinus sont décrites. Les productions industrielles (H_2SO_4 , Cl_2 et les dérivés chlorés, industrie pétrolière, ammoniac, acide nitrique, etc.) complètent ce module d'initiation en offrant aux étudiants la possibilité d'établir des bilans de matière à grande échelle. Les acquis des étudiants à l'issue de ce module sont :

- Les modes de raisonnement utilisés dans le milieu industriel, tout spécialement dans l'industrie chimique ;
- La méthodologie du développement des procédés industriels ;
- La connaissance des lois à la base de l'extrapolation des réactions chimiques de l'échelle du laboratoire à l'échelle industrielle.

Plus ponctuellement, je tente de sensibiliser les étudiants de la Maîtrise de Chimie, option « Environnement » à la notion de qualité et de normes (au sens référentiel du terme) en faisant deux interventions : l'une sur le concept de laboratoire accrédité COFRAC et une autre sur la validation de méthodes analytiques.

Dans le cadre du **DESS Stratégie d'Analyse et Maîtrise de la Qualité en Chimie et Biochimie SAMQB**, j'interviens essentiellement dans 3 unités d'enseignement dans lesquelles je présente les capteurs comme moyen de contrôle en continu. J'explique aux étudiants comment résoudre un problème analytique précis, en leur demandant un effort de synthèse de l'ensemble des techniques dont ils sont devenus familiers. L'objectif est pour les étudiants d'établir un protocole, de l'échantillonnage à l'analyse, pour répondre le problème qui leur a été soumis. Dans le module relatif à leur projet bibliographique, je fournis aux étudiants les clés pour mener à bien ce projet, rédigé en anglais, notamment en leur indiquant les différentes ressources électroniques dont dispose la bibliothèque de notre Université. La structure d'un rapport scientifique est également décrite en

insistant sur l'importance de l'introduction et de la conclusion. La mise en forme des références bibliographiques est également développée en se basant sur le « Guide de gestion des références bibliographiques » produit par l'INSA de Lyon (<http://docinsa.insa-lyon.fr/docinsa/docs/refbibli.html>).

III. Et le LMD dans tout cela ?

En septembre 2005, l'Université Paris XII-Val de Marne entrera de plein pied dans la nouvelle réforme de l'enseignement supérieur dite « LMD. » Lors de la constitution du volet du dossier propre à la Faculté des Sciences et de Technologie, je me suis investi aux niveaux Licence et Master.

III.1 Au niveau Licence

Au niveau Licence, j'ai proposé trois modules d'enseignement dont un module de sensibilisation « **Hygiène et Sécurité** » qui sera accessible à tout étudiant scientifique, de l'informaticien au chimiste en passant par le biologiste ou le mathématicien. Différents aspects seront abordés : le risque chimique, le risque biologique, le risque électrique, le risque incendie, l'arbre des causes, et la gestion des déchets. Un autre module, dont j'ai la responsabilité, sera offert à l'ensemble des étudiants de la Faculté des Sciences et de Technologie, il s'agit de l'enseignement de **la bureautique**, qui reprend pour partie le contenu du module développé dans le cadre du DEUG STPI mais en renforçant le volet « théorique. » Le dernier module s'adressera plus particulièrement aux étudiants de la licence « Sciences Chimiques et Biologiques » et présentera **les grands procédés de fabrication utilisés en chimie industrielle**.

III.2 Au niveau Master

J'ai participé activement à la mise en place de deux masters : le master « **Sciences et Génie de l'Environnement** » (SGE) et le master « **Molécules et Matériaux**. »

Dans le master « **Sciences et Génie de l'Environnement** » (SGE), qui vise à former la majorité de ses étudiants à des métiers de l'environnement dans les différents domaines couverts par ses spécialités, en accord avec les compétences des équipes de recherche fondatrices, à savoir les composantes « chimie » de l'Université Paris 7, « sciences et technologies » de l'Université Paris 12 et sur l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, j'interviens dans les modules de 1^{ère} année : « **Sols pollués milieux et traitements** » (34U4SG41), « **Physico-chimie appliquée à l'étude de processus environnementaux** » (34SG4O12), « **Chimie analytique et spectroscopie** » (34SG4O62). Je suis responsable du module « **mesure et modélisation** » (34U8SD53) en 2^{ème} année dans la spécialité « **Systèmes Aquatiques et Gestion de l'Eau** » (SAGE). L'objectif de la spécialité SAGE est double. Il s'agit d'une part de donner aux étudiants une formation approfondie sur les processus biogéochimiques qui gouvernent la qualité des milieux aquatiques et les interactions de ces milieux dans des environnements régionaux. Il s'agit d'autre part de comprendre et connaître les instruments de la gestion de l'eau, qu'il s'agisse des procédés techniques de collecte et de traitement des eaux ou des principales politiques de l'eau mises en œuvre dans différentes régions du monde. Les débouchés de la spécialité SAGE sont d'une part la recherche dans le domaine de la biogéochimie des systèmes aquatiques et des techniques de traitement de l'eau, d'autre part des emplois à dominante technique dans le domaine de la gestion de l'eau.

Dans le master « **Molécules et Matériaux** », la spécialité « Analyse et Assurance Qualité en Chimie et Biochimie » (AAQCB), bien que suite logique du DESS SAMQCB, renforce les aspects « Qualité » et « Stratégie d'analyse. » Ces modifications sont l'aboutissement des échanges qui ont eu lieu avec les professionnels des différents secteurs industriels (agroalimentaire, analyse, cosmétique, développement et recherche, pharmaceutique...) qui ont accueilli des étudiants en

stage. Dans ce module de spécialité, l'échantillonnage et sa représentativité sont plus détaillés. Ainsi, l'étudiant abordera l'ensemble des aspects de la mise en place d'une nouvelle technique analytique de l'échantillonnage jusqu'à la validation de la technique retenue. Un nouveau module, original, a également été développé. Il permettra de confronter la perception des différents acteurs de la « **Qualité** » (auditeurs et audités) sur la mise en place des référentiels majeurs : ISO 9000, ISO 14000, ISO17025, etc. En effet, des auditeurs chevronnés présenteront ces grands référentiels, alors que des professionnels « Qualité » viendront expliquer ce que représente quotidiennement, pour eux, la mise en application concrète de ces référentiels et les modifications afférentes au sein des structures dont ils dépendent.

ACTIVITES ADMINISTRATIVES

ACTIVITES ADMINISTRATIVES

I. Co-direction du DESS « Stratégie d'Analyse et Maîtrise de la Qualité en Chimie et Biochimie (SAMQCB) »

Le développement des référentiels internationaux de régulation des marchés (normalisation, certification, systèmes de management de la qualité) ainsi qu'une demande croissante de la part des consommateurs de sécurisation des produits mis sur le marché incitent les entreprises à rechercher des professionnels qualifiés et compétents dans les domaines de l'analyse et de la qualité. Il faut noter également un besoin des Etats, que ce soit en Europe ou dans les pays partenaires, de mettre en place des structures de surveillance du marché nécessitant des spécialistes en analyse et contrôles divers. L'objectif principal du DESS « Stratégie d'Analyse et Maîtrise de la Qualité en Chimie et Biochimie (SAMQCB) » est donc de répondre à ces besoins en formant des cadres de niveau bac+5 présentant cette double compétence analyse et qualité. A l'issue de la formation SAMQCB, les étudiants sont capables de s'insérer en France ou à l'étranger dans des unités d'analyse ou de contrôle et dans tout laboratoire ayant mis en place ou souhaitant mettre en place un système qualité. Les enseignements spécifiques de la spécialité SAMQCB s'adressent à des étudiants ayant une formation solide dans les domaines de la chimie et de la physico-chimie. Ils apportent aux étudiants les éléments nécessaires à la résolution de problèmes analytiques concrets (méthodes d'extraction, de préparation, d'analyse de l'échantillon) dans le cadre d'un système qualité. Afin de répondre à ce double objectif, les enseignements sont dispensés par des professionnels ayant une parfaite maîtrise des techniques permettant l'analyse de mélanges complexes, par des chercheurs spécialistes d'une méthode spécifique et par des professionnels travaillant dans le domaine du contrôle et de la qualité. En particulier, l'AFNOR participe activement aux enseignements et un projet de partenariat est en cours de discussion. Les enseignements pratiques s'appuient sur les plateaux techniques de chimie de la Faculté des Sciences et de l'IUT de chimie de l'Université Paris XII Val de Marne. Je suis **co-directeur du DESS SAMQB depuis sa création en 2002**, la direction étant assurée par le Pr. Marie-Claude Millot. Dans cette formation, j'interviens essentiellement dans le recrutement des étudiants, l'organisation des TP, l'encadrement du projet bibliographique et le développement de collaborations avec de nouveaux partenaires. Le recrutement se déroule en deux étapes : une première sélection sur dossier suivi d'une audition des candidats.

II. Responsable Hygiène et Sécurité de la Faculté des Sciences et de Technologie

II.1 Responsable « Hygiène et Sécurité » du plateau technique de chimie

En janvier 2000, j'ai été nommé responsable « Hygiène et Sécurité » du plateau technique de Chimie. Cette fonction a été créée afin de mieux gérer les aspects concernant le respect des règles élémentaires de sécurité dans les salles de TP de Chimie ainsi que tout ce qui concerne la gestion des déchets générés par ce type d'enseignement. Toutes les actions se font en concertation avec l'Ingénieur Hygiène et Sécurité de l'Université mais également les différents responsables des modules d'enseignement. Le premier objectif que nous avons atteint est la mise en place d'une collecte des déchets spécifiques aux TP, cette collecte a d'ailleurs été étendue aux laboratoires de recherche. Un audit a été réalisé afin de connaître avec plus de précision les volumes générés par les différentes manipulations et permettre d'établir le coût de la mise en place d'une telle collecte. De même, un questionnaire a été envoyé à chaque intervenant en TP pour déterminer comment le message concernant la sécurité en laboratoire est transmis et tenter une uniformisation des discours. Les sorbonnes ont fait l'objet d'un état des lieux qui a mis en évidence la vétusté de bon nombre d'entre elles. Un contrat de maintenance a été mis en place à la suite de ce contrôle pour les hottes

les plus récentes afin de garantir leur fonctionnement optimal. Un dossier pour une remise en état de l'ensemble des sorbonnes dépendant du plateau technique de chimie a également été constitué.

II.2 Système d'évaluation des risques

L'évaluation a priori des risques professionnels (décret n°2001-1016 du 5 novembre 2001) consiste à identifier et classer les risques auxquels sont soumis les salariés d'un établissement, en vue de mettre en place des actions de prévention pertinentes. Elle constitue l'étape initiale d'une politique de santé et de sécurité au travail. L'évaluation a priori des risques professionnels est une démarche structurée dont les résultats sont formalisés dans un document unique. Ce document sera mis à la disposition du CHS, du médecin du travail et, sur demande, de l'inspecteur du travail et des contrôleurs CRAM. Au niveau de l'Université Paris XII-Val de Marne, l'évaluation des risques professionnels a suivi une démarche classique en respectant les étapes suivantes : la préparation de l'évaluation des risques (avec constitution d'un comité de pilotage), l'identification des risques, le classement de ces risques et enfin des propositions d'actions de prévention. Le groupe de pilotage a surtout assuré la première phase de la mise en place de l'évaluation des risques professionnels, qui a consisté à définir le cadre de l'évaluation et les moyens qui lui sont alloués, préalablement à son déroulement. C'est lors de cette phase de préparation qu'ont été définis et assurés :

- L'organisation à mettre en place, la notion d'unité de travail ;
- La désignation d'un groupe par unité de travail qui coordonne et rassemble les informations ;
- Les outils mis en œuvre pour l'évaluation ;
- La formation interne nécessaire ;
- Et la communication.

En tant que membre du comité de pilotage de la mise en place du système d'évaluation des risques, j'ai été nommé responsable de cette procédure pour la Faculté des Sciences et Technologie. Au sein d'un groupe de travail, constitué de quatre personnes, mon rôle est de coordonner la mise en place de cette démarche et d'assurer le relais avec les Services Centraux de l'Université Paris XII-Val de Marne. Les résultats de l'évaluation des risques devront être transcrits sur un document unique pour toute l'Université. Trois modalités d'actualisation de ce document unique, prenant en compte les éventuelles modifications de la situation du travail dans l'établissement sont prévues : une mise à jour annuelle, une mise à jour ponctuelle, et une mise à jour dès que des informations supplémentaires concernant l'évaluation des risques auront été recueillies.

III. Correspondant « (Nouvelles) Technologies de l'Information et des Communications » de la Faculté des Sciences et de Technologie

En janvier 2000, dans l'optique du nouveau plan quadriennal de l'établissement, j'ai lancé un audit au niveau de la Faculté des Sciences et de Technologie pour évaluer l'intérêt envers les (Nouvelles) Technologies de l'Information et des Communications (TIC) de ses enseignants ainsi que leur besoin afin de constituer une cellule de travail ayant pour mission de faire aboutir les différents projets qui ne sont encore qu'au stade embryonnaire. Cet audit a souligné le retard de la Faculté des Sciences dans le domaine des TIC et la nécessité de les structurer. Le premier pas a été la création d'une salle multimédia de 6 postes, en 2002, à l'attention des enseignants afin de leur permettre de se former à la production de documents pédagogiques interactifs. Mais le plus important, à savoir une véritable structuration des TIC à la Faculté des Sciences, reste à développer.

IV. Tutorat de moniteurs

Depuis septembre 1997, j'ai maintenu mon implication dans le système du monitorat dont j'avais bénéficié durant ma thèse. En effet, lorsque j'étais moniteur de l'Université de Franche-Comté, j'étais à la fois membre du comité pédagogique du Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur (CIES) de Lyon et co-organisateur de stage à l'attention des moniteurs des 1^{ère} et 2^{ème} années (stages qui traitaient de l'utilisation de Word et Excel notamment comme outil potentiel de gestion et de mise en forme de références bibliographiques). Dorénavant je suis tuteur et participe à quelques heures de formation des moniteurs lors de stages à l'Université Paris XII-Val de Marne. De septembre 1997 à août 1999, j'ai encadré, dans ses activités pédagogiques, Alexis Groleau. De septembre 1999 à août 2001, Laure Tessier est venue le remplacer. Mon rôle consiste essentiellement à rassurer le moniteur avant ses premières prises de contact avec les étudiants, mais également à répondre aux différentes questions qu'il pourrait se poser soit dans l'approche d'une séance de TD ou TP, soit dans la façon d'évaluer des TP, etc.

V. Conseil de Gestion de la Faculté des Sciences de Paris XII-Val de Marne

J'ai été élu lors de son renouvellement, en février 2002, membre du Conseil de Gestion de la Faculté des Sciences et de Technologie de l'Université Paris XII-Val de Marne. Je fais depuis cette date partie du bureau du Conseil de Gestion, constitué de 4 personnes en plus du Doyen. La responsable administrative de la composante, siège de droit, un Professeur, un Maître de Conférences et un représentant IATOS sont élus par le Conseil de Gestion réuni en séance plénière.

VI. Comité « Hygiène et Sécurité » de l'Université de Paris XII-Val de Marne

Je suis membre du « Comité Hygiène et Sécurité » (CHS) de l'Université Paris XII-Val de Marne depuis mai 2003. Dans ce cadre, j'ai participé à la création d'une affiche sur les consignes de sécurité en laboratoires (d'enseignement et de recherche) de chimie et biologie et à celle d'un synoptique du guide de gestion des déchets chimiques en vigueur à l'Université Paris XII-Val de Marne. J'interviens dans les journées de formation (deux par an) dédiées aux nouveaux personnels et nouveaux étudiants chercheurs (DEA, thésards, post-docs) pour la partie consacrée aux risques chimiques. Je participe en tant que chimiste aux visites annuelles (3 à 4 par an) effectuées par une délégation du CHS. C'est en tant que membre du CHS que je participe au groupe de travail sur l'évaluation des risques professionnels. J'ai également suivi plusieurs formations dans le domaine « Hygiène et Sécurité » :

- Initiation incendie (1 ½ journée) en 1999 ;
- Initiation au maniement des différents extincteurs (1 ½ journée) en 1999 ;
- Formation aux gestes élémentaires de secourisme (5 ½ journées) en 2001 ;
- Formation aux gestes élémentaires de secourisme : remise à niveau (1 ½ journée) en 2003.

VII. Commissions de Spécialistes

Depuis 2001, soit deux mandats, je suis membre élu de la Commission mixte de Spécialistes de l'Université Paris XII-Val de Marne (31-32-33-64^{ème} sections). Lors de mon premier mandat, j'étais membre du bureau en tant que représentant du collège B. Depuis 2001, je suis également membre extérieur de la Commission de Spécialistes (32^{ème} section) de l'Université Paris VII Denis Diderot.